

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**Estudo do processo de soldadura a laser em “*Tailor Welded Blanks (TWB)*” de Ligas de Alumínio**

André Xavier Figueiredo da Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador na EDAETECH: Engenheiro António Morais

Orientadores na FEUP: Prof. António Augusto Fernandes e

Prof. Abel Dias dos Santos

27 de Junho de 2014

*Aos meus pais e irmã e avó.*

## Resumo

A soldadura a laser é um processo de elevado potencial na produção de TWB -*Tailor Welded Blanks* (esboços para posterior estampagem, constituídos por materiais da mesma ou diferentes espessuras) para a indústria automóvel.

Desta forma o presente trabalho teve como objetivo descrever os resultados da investigação de soldadura a laser de fibra em chapas de ligas de alumínio Al 5083 H111 e Al6082 T6 nas espessuras de 1 e 0,8mm. Para testar o comportamento dos materiais após as soldaduras foram realizados ensaios de dobragem, tração e formabilidade. Por outro lado, foram feitos ensaios metalográficos e de microdureza para analisar as características do cordão de soldadura obtido através de determinadas combinações de parâmetros de soldadura.

Os resultados obtidos comprovam que parâmetros como a velocidade de soldadura, potência, localização do ponto focal, posicionamento do gás de assistência e o tipo de gás utilizado na soldadura estão diretamente relacionados com a qualidade da soldadura obtida e mostram ainda a necessidade de investigação e desenvolvimentos adicionais para a obtenção de formabilidade adequada nos componentes desejados.

## **Study of welding process Laser TWBs "Tailor Welded Blanks" of Aluminum Alloys.**

### **Abstract**

Laser Welding is a process of high potencial on the production of TWBs - *Tailor Welded Blanks* (blanks for stamping operations, which are composed by materials of the same or different thicknesses) for the automotive industry.

Thus, the current study aimed to describe the results of the research of fiber laser welding of aluminum alloy sheets of Al 5083 H111 and Al6082 T6, thickness of 1 and 0.8 mm. To test the behavior of materials after the welding several tests were performed, e.g., bending test, tensile test and formability tests. Additionally, several metallographic and microhardness tests were done for analysis of the weld bead, obtained for a particular combination of welding parameters.

The results show that parameters such as welding speed, power, location of the focal point, placement of the assistance gas and the type of gas used in welding are directly related to the obtained quality of the weld and it shown that some additional research and development is important in order to obtain the needed formability for welded components.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar queria agradecer à EDAETECH a oportunidade de realizar este trabalho em ambiente empresarial. Quero também agradecer à secção de engenharia e aos funcionários da secção laser por todo o apoio facultado.

Queria agradecer ao meu orientador Eng. António Morais por todas as indicações, ajudas e acompanhamento prestado. O meu agradecimento especial ao Eng. Luís Carneiro por toda a ajuda prestada na realização dos ensaios no Laser.

Gostaria também de agradecer aos meus orientadores Prof. António Augusto Fernandes e Prof. Abel Dias dos Santos por toda a disponibilidade demonstrada e pela ajuda na procura de novas soluções para este projeto.

Um agradecimento especial ao Eng Miguel Figueiredo por toda a ajuda prestada na realização do projeto.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por todo o acompanhamento prestado ao longo do meu percurso académico.

À D. Emília Soares por toda a ajuda e disponibilidade na preparação das amostras e análise das mesmas.

Um agradecimento especial à técnica Armada do Laboratório de Metalografia do INEGI pela disponibilidade prestada.

Aos Engenheiros Rui e Hugo pela colaboração na realização dos ensaios de formabilidade.

Por fim também agradecer a minha família por todo o apoio demonstrado não só neste projeto mas também ao longo do meu percurso académico.

## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos do projeto .....	2
1.3	Estrutura do trabalho .....	2
2	Revisão bibliográfica .....	3
2.1	Tecnologia Laser .....	3
2.1.1	Princípios da física do Laser .....	4
2.1.2	Procedimento da soldadura a laser .....	7
2.1.3	Fontes de Laser .....	11
2.1.4	Gás de proteção .....	12
2.1.5	Vantagens e limitações da soldadura a laser .....	14
2.2	Alumínio e suas ligas .....	15
2.2.1	Características do alumínio .....	16
2.2.2	Ligas do alumínio .....	17
2.2.3	Nomenclatura das ligas de alumínio .....	17
2.2.4	Nomenclatura dos tratamentos térmicos das ligas de alumínio .....	18
2.3	TWBs Tailor Welded Blanks .....	19
3	Metodologia Experimental .....	25
3.1	Apresentação da EDAETECH- Engenharia e Tecnologia, S.A. ....	25
3.2	Equipamento Utilizado .....	26
3.3	Plano e ensaios .....	28
3.4	Material Utilizado .....	29
3.5	Parâmetros do processo .....	30
3.6	Ensaio experimentais do TWBs .....	32
3.6.1	Ensaio de dobragem .....	32
3.6.2	Ensaio de tração .....	33
3.6.3	Ensaio de Formabilidade .....	35
3.6.4	Ensaio Metalográficos .....	38
3.6.5	Análise da Microdureza .....	40
4	Apresentação e discussão dos resultados obtidos .....	42
4.1	Ensaio de Dobragem .....	43
4.2	Ensaio de tração .....	45
4.3	Ensaio de formabilidade .....	49
4.4	Análise Microestrutural .....	52
4.5	Microdurezas .....	54
4.6	Caso prático da aplicação de um componente embutido com TWB. ....	57
5	Considerações finais .....	59
5.1	Conclusões .....	59
5.2	Trabalhos futuros .....	60
6	Referências e Bibliografia .....	61

## Índice de Figuras

Figura 1- Físico que construiu o primeiro laser Theodore Maiman. ....	3
Figura 2- Diagrama da emissão estimulada. (Steen 2003) .....	5
Figura 3- Esquema dos processos laser de: a) três níveis,.....	5
Figura 4- Elementos de oscilador laser. (Siegman 1986).....	6
Figura 5- Princípio da soldadura profunda. (TRUMPF Laser) .....	7
Figura 6- Geometria do Laser (TRUMPF Laser) .....	8
Figura 7- Posição do ponto focal. (TRUMPF Laser) .....	9
Figura 8- Variação da refletividade em função do comprimento de onda do laser e à temperatura ambiente. (TRUMPF Laser) .....	10
Figura 9- a) Distribuição de energia Gausseana ou <b>TEM00</b> , b) Distribuição <b>TEM01</b> (Adira Laser).....	10
Figura 10- Posicionamento do bico de gás de proteção ideal para a realização da soldadura (Pastor 1999).....	13
Figura 11- a) Alumínio representa 8% da crosta terrestre, figura adaptada de (Davis 1993). ..	16
Figura 12- Correspondência entre as diferentes ligas de alumínio e respectivos elementos de liga. (Davis 1993) .....	17
Figura 13 - Comparação esquemática do processo de fabrico de componentes compostos por chapas com características diferentes: a) Método de fabrico convencional; b) Método de fabrico aplicando TWB. (Baptista 2006).....	20
Figura 14- Varias aplicações dos TWB. (Brad Kinsey 2001) .....	20
Figura 15- Tipos de uniões de chapas mais comuns para o processo de TWB (Baptista 2006) .....	21
Figura 16- Preparação das bobines de chapa.....	22
Figura 17- União de dois componentes por Mash Seam Weld .....	23
Figura 18: Sede da empresa EDAETECH.....	25
Figura 19 - Departamento da Engenharia.....	26
Figura 20- Trumpf Laser Cell 1005.....	27
Figura 21- Bilboa.....	27
Figura 22- Afastamento existente entre os dois provetes a soldar. ....	31
Figura 23- Ilustração do suporte de fixação a construir. ....	31
Figura 24- a) Gabari modelado no CATIAV5 b) Gabari final. ....	32
Figura 25- Equipamento de dobragem com guiamento utilizado nos ensaios. ....	33
Figura 26 - Dimensões dos provetes para o ensaio de dobragem.....	33
Figura 27- Dimensões do provete segundo norma ASTM E 8M-04.....	34

Figura 28- Dimensões do provete segunda a norma ASME IX .....	34
Figura 29- Máquina de ensaios de tração utilizada - Instron Series 3367 .....	35
Figura 30- Dimensão dos provetes para o ensaio de Nakajima.....	36
Figura 31- Esquema da ferramenta utilizada para a execução dos ensaios .....	36
Figura 32- Grelha de círculos aplicada no material em estudo. ....	37
Figura 33 - Marcação eletroquímica de grelhas de círculos.....	37
Figura 34- Determinação da CLE usando diferente trajetórias de deformação. (Vaz 2013) ...	38
Figura 35- Amostras preparadas em resina de Epoxídica. ....	39
Figura 36- Struers RotoPol-21 .....	39
Figura 37- Microscópio Poland Olympus PMG3.....	40
Figura 38 - HMV-2000 SHIMADZU .....	41
Figura 39- Localização das regiões onde será medida a microdureza. ....	41
Figura 40 - a) Desalinhamento dos provetes após a soldadura; b) Falta de penetração. ....	42
Figura 41- Comportamento dos provetes em contacto.....	44
Figura 42- Gráfico tensão deformação do material Al5083 H111. ....	45
Figura 43- Extensão após rutura.....	46
Figura 44- Gráfico tensão deformação do material Al6082 T6.....	47
Figura 45- Extensão após rutura.....	47
Figura 46- Gráfico tensão deformação do provete composto pelos materiais Al6082 T6 e Al5083 H11 .....	48
Figura 47- Dimensão do cordão de soldadura antes (a) e após fecho (b) do cerra-chapas.....	50
Figura 48-Vista lateral dos provetes, mostrando a baixa formabilidade obtida no cordão de soldadura.....	50
Figura 49- Visualização de poros na zona do cordão de soldadura.....	51
Figura 50- CLE para o material Al 5182. (R Safdarian et al 2014 ) .....	51
Figura 51 - Secção transversal do material Al5083 H111 na espessura de 1mm.....	52
Figura 52- Secção transversal do material Al6082 T6 na espessura de 0,8mm. ....	53
Figura 53- Secção transversal do material Al5083 H111 na espessura de 0,8mm.....	53
Figura 54- Secção transversal do material Al6082 T6 na espessura de 0,8mm .....	54
Figura 55- Perfil de dureza para o Al5083H11 espessura 1mm.....	55
Figura 56- Perfil de dureza para o Al5083H11 espessura 0,8mm.....	55
Figura 57- Perfil de dureza para o Al6082T6 espessura 1mm. ....	56
Figura 58 - Perfil de dureza para o Al6082T6 espessura 1mm .....	56
Figura 59- Peça no seu formato original. ....	57
Figura 60- Planificado após soldadura .....	57



Figura 61- Componente com a aplicação dos TWBs. ....	58
--	----

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Condições metalúrgicas da liga. (Davis 1993) .....	18
Tabela 2- Plano amostral de ensaios.....	28
Tabela 3- Composição química do Al5083 H111 .....	29
Tabela 4- Propriedade da Liga Al 5083 H111.....	29
Tabela 5- Composição química do Al6082 T6.....	30
Tabela 6-Propriedade Mecânicas do Al6082 T6. ....	30
Tabela 7 - Plano de Amostras para os ensaios.....	43
Tabela 8 - Ensaios de dobragem obtidos por soldadura a Laser .....	44
Tabela 9- Característica do material base Al5083 H111 .....	45
Tabela 10-Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al5083 H111 .....	46
Tabela 11- Característica do material base Al6082 T6 .....	46
Tabela 12- Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al6082 T6..	47
Tabela 13-Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al5083 H111 com Al 6082 T6.....	48
Tabela 14- Apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de formabilidade. ....	49
Tabela 15 - Dureza do material de base. ....	54

## 1 Introdução

### 1.1 Motivação

Esta dissertação abrange uma forte componente industrial visando a aquisição de conhecimentos no sector da metalurgia e metalomecânica, mais propriamente nos processos de embutidura/ estampagem e soldadura a laser. Desta forma, este relatório pretende transmitir os conhecimentos adquiridos durante o período de dissertação na empresa EDAETECH.

As novas tendências mundiais de mercado: alta qualidade e minimização de custos, são de grande importância para a sobrevivência da indústria. Na indústria automóvel há uma busca constante de novas tecnologias. A soldadura a laser de ligas de alumínio sem adição de material é uma tecnologia que já apareceu há alguns anos mas ainda há muito para descobrir. A aplicação desta técnica permite não só uma boa qualidade, bem como a redução de custos e tempo de produção. De entre as várias vantagens destaca-se o facto de a soldadura a laser ser um processo quimicamente limpo e com a obtenção de uma zona afetada pelo calor ZAC bastante reduzida. A qualidade de soldadura depende do ajuste de parâmetros como: velocidade de soldadura, potência, localização do ponto focal entre outros.

Se aliar à soldadura a laser a técnica de *Tailor Welded Blanks* as vantagens podem ainda aumentar. A soldadura de *Tailor Blanks* consiste em soldar duas ou mais chapas finas de espessuras diferentes, com uma configuração plana, para posteriormente serem estampadas.

Os *Tailor Welded Blanks* vieram substituir a forma convencional de montagem da carroçaria de um automóvel que consistia na estampagem das várias peças da carroçaria em primeiro lugar e só depois ocorrer a sua agregação. Com os *Tailor Welded Blanks* primeiro é construído um planificado composto por materiais e espessuras diferentes, que são agregados, por exemplo, por soldadura a laser e só depois o planificado é submetido à estampagem. Com a utilização desta técnica para além da redução do tempo de produção, também ocorre uma redução do número de ferramentas, visto que apenas é necessário uma ferramenta de estampagem em vez das várias ferramentas utilizadas para as peças, que só eram soldadas depois de estampadas. Mesmo sendo um processo com alguns anos de existência ainda existem alguns entraves, como por exemplo, devido às chapas serem de espessura reduzida, e com a passagem do laser poderá ocorrer algum empeno causando o desalinhamento do cordão da soldadura comprometendo a qualidade da peça.

Devido às políticas ambientais que cada vez mais restringem a emissão de gases poluentes para a atmosfera, a utilização dos *Tailor Blanks* aliados à aplicação de ligas de alumínio, tem

levado a obtenção de melhores rendimento e aerodinâmica dos automóveis, levando á redução do consumo de combustível em mais de 25%.

## 1.2 Objetivos do projeto

Tendo em vista a importância dos *Tailor Welded Blanks* de alumínio na indústria automóvel e a sua execução ainda não estar bem entendida em relação aos parâmetros a aplicar na soldadura e as microestruturas resultante, estabeleceu-se como objetivo do trabalho os seguintes pontos:

- Otimização de processos “*Tailor Welded Blanks*” em ligas de Alumínio;
- Definir requisitos ideais para a concretização do processo;
- Caracterizar comportamentos de diferentes junções de ligas de alumínio ensaiadas;

## 1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho é realizada em 6 capítulos. No primeiro é realizado uma introdução sobre o tema de trabalho referindo também os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre a história e princípios do laser, o alumínio e nomenclaturas aplicadas as suas ligas e respetivos tratamentos térmicos, assim como toda a história e vantagens e desvantagem da utilização de Tailored Welded Blanks.

No terceiro capítulo são explicados todos os procedimentos experimentais de todos os ensaios realizados, os materiais utilizados nos ensaios bem como apresentada a empresa onde foi realizada a tese.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos.

No quinto capítulo são feitas as respetivas conclusões e possibilidades de desenvolvimento do trabalho.

No sexto capítulo são indicadas todas as referências utilizadas.

## 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos, de modo a oferecer conhecimento para ajudar o leitor a seguir os assuntos discutidos nesta tese.

### 2.1 Tecnologia Laser

Antes de ser construído o primeiro laser foram necessários quase quarenta anos de investigação levada a cabo por vários investigadores. De entre as investigações realizadas destacam-se a de Albert Einstein em 1917, onde foram realizados os primeiros estudos sobre o tema. Tem também grande importância o trabalho realizado por Max Planck e Niels Bohr onde se ficou a perceber melhor a física dos lasers. Em 1958 AL Schawlow e CH Townes publicaram o primeiro artigo sobre o assunto. Mas como já foi referido, foi necessário chegar a 1960 (quarenta anos após os primeiros estudo) para ser construída a primeira máquina a laser conseguida por Theodore Maiman.

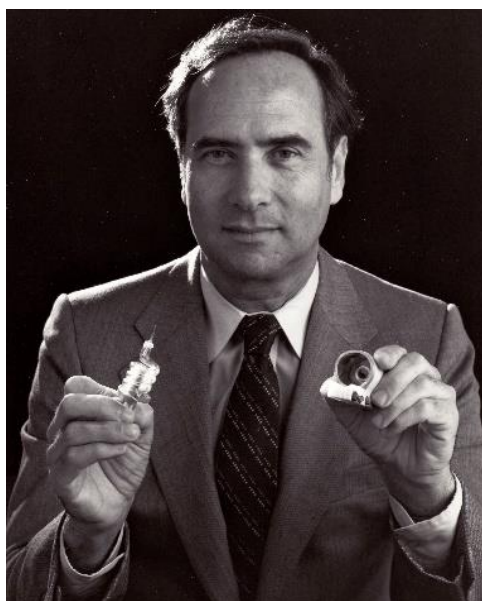


Figura 1- Físico que construiu o primeiro laser Theodore Maiman.

Após o seu aparecimento, as pesquisas para o desenvolvimento dos lasers foram intensificadas, devido em parte ao grande investimento militar, que se fascinava com o chamado “raio da morte”. Com este investimento vários lasers de diferentes meios ativos surgiram, porém, poucos se mostraram práticos.

Com o aparecimento de inúmeros lasers foi havendo um melhoramento dos princípios de geração de energia, sendo possível a extração de mais potência e a geração de feixes de melhor qualidade aumentando assim as suas aplicações.

Tal como o laser também o processamento de materiais passou pela mesma evolução. Modos de fabricação antes impensáveis, com o aparecimento do laser, tornaram-se processos mais rápidos e com melhor qualidade de fabricação.

A soldadura a laser é um desses processos. À medida que surgem lasers mais potentes, com feixes de melhor qualidade e com sistemas de entrega do feixe mais práticos melhores serão os resultados obtidos no processo.

### 2.1.1 Princípios da física do Laser

Sendo Laser o acrónimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificação da Luz por Emissão de Radiação Estimulada), um laser é essencialmente um dispositivo que gera um feixe estreito de luz suficientemente forte para perfurar, cortar ou soldar.

O princípio físico por detrás do laser pode ser resumido a átomos que já se encontram no estado excitado e que ao minimizar a sua energia  $hc$ , emitem um fóton. A emissão desse fóton é proporcionada durante a queda dos átomos excitados, onde ocorre um choque/incidência com outros fótons levando à libertação da energia de excitação em forma de fótons. Para que este fenómeno aconteça a energia do fóton incidente deve apresentar um valor entre o estado  $E_1$  e  $E_2$  (ver Figura 2), gerando um fóton da mesma frequência do fóton incidente. ([Steen 2003](#))

Não há distinção física entre o fóton excitante e o fóton emitido; todos eles têm a mesma fase e comprimento de onda.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (1)$$

$h$ - Constante de Planck ( $6.62606896(33) \times 10^{-34}$  Js)

$c$ - Velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup>)

$\lambda$ - Comprimento de onda (m)

$\nu$ - Frequência da radiação (s<sup>-1</sup>)

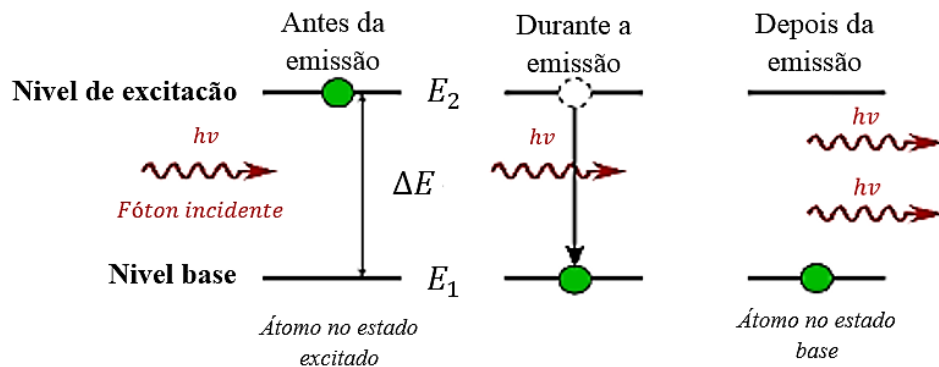


Figura 2- Diagrama da emissão estimulada. (Steen 2003)

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2)$$

A emissão estimulada apenas pode ser gerada em materiais que demonstrem ter eficiência necessária. A eficiência é medida pelo tempo que o átomo demora a “cair” de um estado para o outro, o qual define a facilidade ou não de se gerar luz por emissão estimulada.

Para que ocorra a emissão estimulada é necessária uma condição de “inversão de população”, em que há mais partículas no estado excitado ( $E_2$ ) do que no estado de baixa energia ( $E_1$ ), Figura 2. Essa condição é atendida quando o tempo de vida do estado excitado é maior do que o de estado de baixa energia. A inversão de população pode ser observada, tipicamente, em processos de excitação de três e quatro níveis, ilustrados na Figura 3.

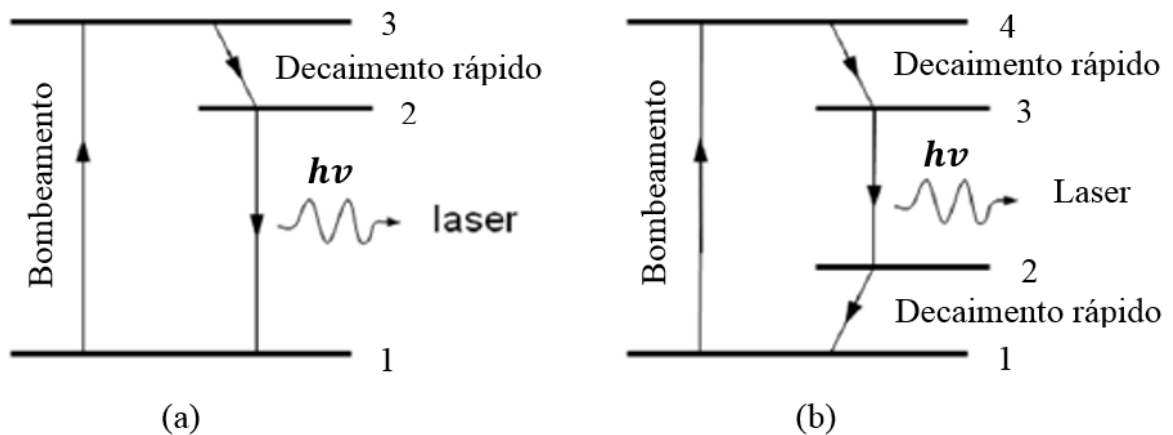


Figura 3- Esquema dos processos laser de: a) três níveis,  
b) quarto níveis. (Svelto 1998)

O ambiente onde se sucede este processo de emissão estimulada é intitulado de meio ativo. Geralmente, o meio ativo é localizado entre dois espelhos paralelos, que formam um oscilador ótico, isto é, a luz reflete nos dois espelhos viajando infinitamente. Um dos espelhos é totalmente refletor, enquanto o outro é parcialmente refletor, permitindo a “entrega” do feixe do laser. Assim, a luz é amplificada no meio ativo pelo mecanismo de emissão estimulada, daí o nome de laser. ([Svelto 1998](#)). A Figura 4 apresenta um desenho esquemático da geração de laser.

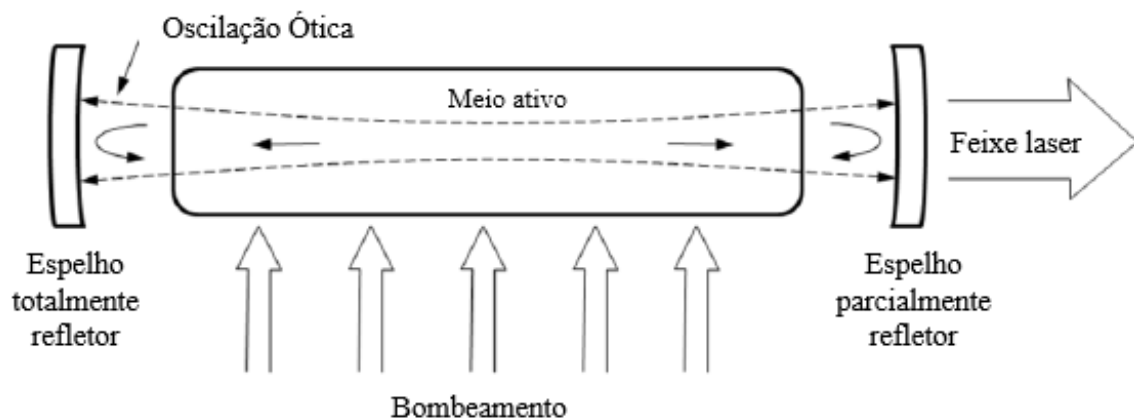


Figura 4- Elementos de oscilador laser. ([Siegman 1986](#))

As propriedades do feixe do laser são as seguintes:

- Monocromático, devido a todos os fótons terem o mesmo comprimento de onda;
- Coerente, pois todos os fótons se encontram na mesma fase;
- Focado, pois todos os fótons seguem a mesma direção;

Um equipamento laser normalmente é composto pelos seguintes componentes:

- Fonte do raio laser;
- Dispositivos para guiar, moldar e focar o laser;
- Sistema para criar um movimento relativo entre o feixe do laser e peça de trabalho (2D ou 3D);
- Sistema de arrefecimento; ([Svelto 1998](#))

### 2.1.2 Procedimento da soldadura a laser

Há vários fatores que influenciam a solda e que estão diretamente relacionados com o próprio feixe do laser. É necessário conhecer todos os parâmetros que podem ser controlados e entender como eles afetam a qualidade da soldadura.

Quando a soldadura ocorre apenas pela condução térmica, o material que está a ser soldado é fundido apenas na superfície, sendo atingida uma espessura de soldadura muito reduzida, cerca de uma décima de milímetro.

Para a obtenção de uma soldadura de qualidade e profunda é indispensável que seja formado o *keyhole*. O *keyhole* consiste num aquecimento do local do ponto focal do laser acima do ponto de ebulição. A partir daí ocorre um furo com a vaporização do metal que será, preenchido com gás metálico ionizado o qual se torna um absorvente eficaz, retendo cerca de 95 % da energia emitida pelo laser. Para que haja a formação do *keyhole* é necessário que a densidade de potência do laser seja superior a  $106 \text{ W / cm}^2$ . ([TRUMPF Laser](#))

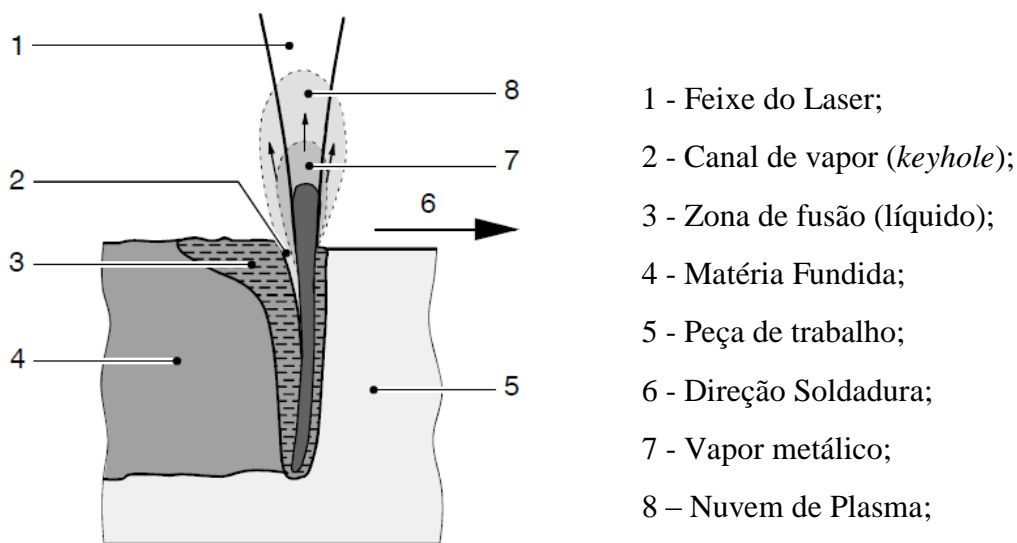


Figura 5- Princípio da soldadura profunda. ([TRUMPF Laser](#))

As temperaturas dentro deste *keyhole* podem atingir até  $25.000^\circ \text{C}$ , tornando a técnica muito eficiente pois, em vez de o calor ser conduzido principalmente para baixo a partir da superfície, ele é conduzido inteiramente a partir do *keyhole*, formando uma região fundida em torno do vapor. À medida que o feixe do laser se move ao longo da peça, o metal fundido vai preenchendo o *keyhole* que fica para trás sendo preenchido pelo material que solidifica e forma o cordão de soldadura.

Esta técnica permite a penetração profunda a alta velocidade de soldadura a fim de obter uma altura e diâmetro do foco muito pequenos, em torno das centenas de microns.



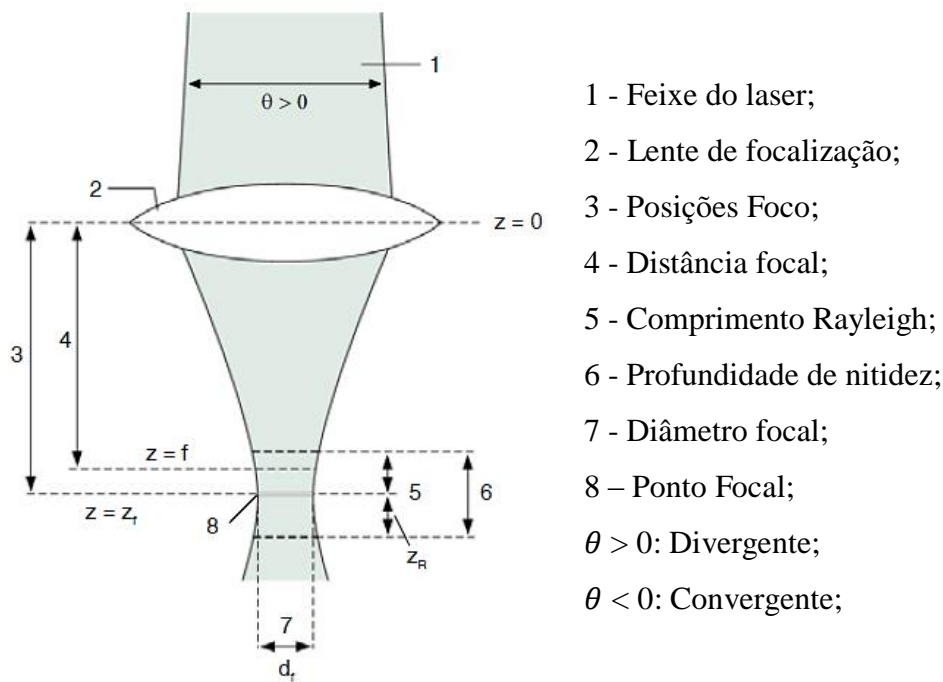


Figura 6- Geometria do foco do laser ([TRUMPF Laser](#))

A lente focal utilizada tem uma relação direta com o diâmetro focal obtido.

$$d_f = \frac{K \lambda f}{D_l} \quad (3)$$

- $d_f$ - Diâmetro focal;  
 $K$  – Fator de qualidade do feixe;  
 $\lambda$  – Comprimento de onda;  
 $f$  – Distância da lente ao ponto focal;  
 $D_l$ - Diâmetro da lente;

A partir da equação 3 conclui-se que para soldar, quanto menor for a lente melhores serão os resultados pois maior irá ser o diâmetro focal.

Teoricamente para a melhor qualidade de soldadura o ponto focal deve ser definido na superfície da peça de trabalho, mas segundo uma conceituada marca de laser *TRUMPF Laser* é recomendado soldar com o ponto focal um pouco abaixo da superfície mais propriamente a meio do material (Figura 7), a fim de produzir melhores resultados.

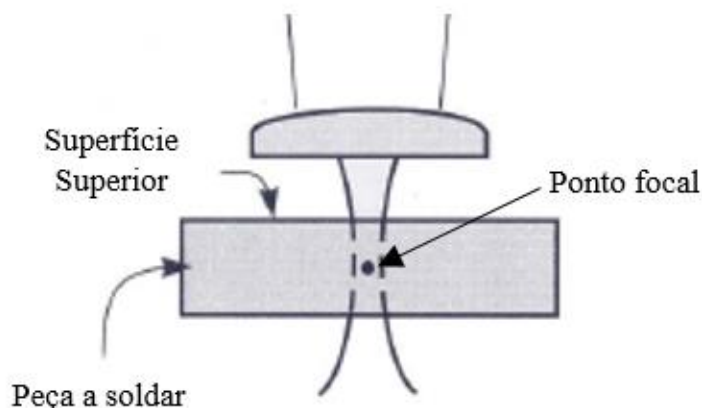


Figura 7- Posição do ponto focal. ([TRUMPF Laser](#))

O laser pode ser aplicado em dois modos, o modo pulsado ou em modo contínuo. O modo pulsado é melhor para o revestimento e para a soldadura regular. Quando se fala do modo pulsado deve-se controlar três parâmetros para se obter pulsos com as características desejadas, sendo esses parâmetros a frequência, o comprimento e a velocidade.

Já o modo contínuo (CW) apresenta melhores resultados para soldas onde são aplicadas altas cargas, porque há menos concentração de tensões, reduzindo os problemas de fadiga. No modo CW só se controla a velocidade. Neste estudo, todas as soldas foram realizadas no modo CW.

Outro parâmetro de igual forma importante é o comprimento de onda, que consiste num valor fixo que depende do meio onde é gerado o feixe laser. No caso dos lasers de meio gasoso CO<sub>2</sub> o comprimento de onda é 10,6  $\mu m$ . Esta grandeza tem grande influência sobre a energia que é absorvida pelo material onde o feixe incide.

Nos materiais mais comuns a absorção decresce pela seguinte ordem: ferro, titânio, alumínio, cobre. Isto dá uma ideia da dificuldade com que se pode cortar cada um destes materiais. A Figura 8 ilustra o valor da refletividade de alguns materiais, para um determinado comprimento de onda. Nos ensaios realizados será utilizado um laser de fibra com um comprimento de onda de 1,07  $\mu m$ .

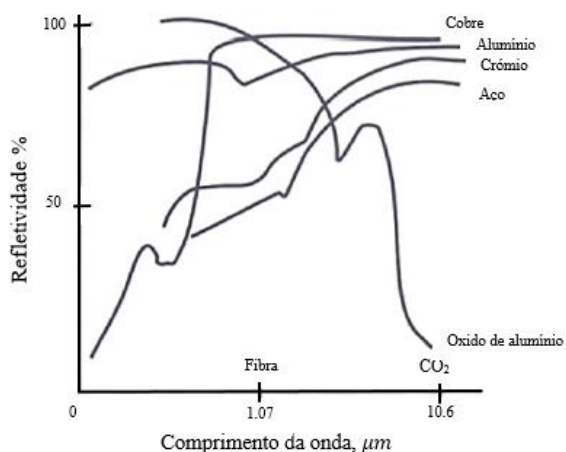


Figura 8- Variação da refletividade em função do comprimento de onda do laser e à temperatura ambiente. ([TRUMPF Laser](#))

Um outro parâmetro a ter em conta tem a ver com a qualidade do feixe, divergência e distribuição da intensidade de energia. A distribuição espacial da energia num feixe de laser, é gerada ao longo da cavidade ressonante e é denominada de Modo Transversal Eletromagnético (TEM).

A radiação que deixa a cavidade ressonante apresenta uma distribuição temporal e espacial em forma *Gaussiana*. A ordem destes modos depende da configuração utilizada na cavidade ressonante. De uma forma geral, modos de ordem mais baixa e de simetria circular são preferencialmente os mais utilizados nos equipamentos comercializados, pois apresentam uma melhor distribuição da energia.

Os Modos Transversais Eletromagnéticos  $TEM_{mn}$ , que possuem os campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si, com simetria circular, de ordem mais baixa são denominados como  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{10}$ . Para estes modos, o perfil de intensidade do feixe, representa uma distribuição radial. De seguida são apresentadas as formas básicas de alguns perfis de potência dos modos.



a)



b)

Figura 9- a) Distribuição de energia Gaussiana ou  $TEM_{00}$ , b) Distribuição  $TEM_{01}$  ([Adira Laser](#))

$$M^2 = 2m + n + 1 \quad (4)$$

Para fazer corte a laser normalmente é utilizado o modo  $TEM_{00}$  onde a energia máxima se concentra apenas num ponto. (Tinoco 2010). Para o feixe  $TEM_{00}$ ,  $M^2$  toma o valor 1, o que implica qualidade máxima (Powell 1993). Já no caso da soldadura é utilizada uma distribuição do tipo  $TEM_{01}$  ( $M^2 \approx 2$ ) a qual possui uma maior dispersão de energia.

A qualidade do feixe pode ser avaliada a partir do fator de qualidade  $K$ . Sendo este definido por:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \times \frac{1}{W_0 \theta_0} \quad (5)$$

$\lambda$  - Comprimento de onda do laser;

$W_0$  – Diâmetro mínimo do feixe na zona de convergência;

$\theta_0$  - Divergência do feixe;

Quanto mais próximo de “1” for o valor de  $K$ , melhor qualidade terá o feixe. Este fator de qualidade, na prática traduz-se numa baixa divergência e elevada concentração de energia.

### 2.1.3 Fontes de Laser

Os lasers para o processamento de materiais são qualificados por: meio ativo (gás, líquido ou sólido), potência, comprimento de onda (infravermelho, visível ou ultravioleta), modo de operação (contínuo, pulsado ou ambos) e aplicação (soldagem, corte, etc.).

Atualmente na indústria, os lasers de alta potência mais utilizados são os de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o de cristais de óxido de ítrio-alumínio dopado com neodímio (Nd:YAG). Mais recentemente surgiu um novo meio chamado laser de fibra, competindo diretamente com o  $CO_2$  e o Nd:YAG.

#### Laser $CO_2$

O meio ativo do laser de  $CO_2$  consiste numa mistura gasosa a baixa pressão de aproximadamente 78% de He, 12% de  $N_2$  e 10% de  $CO_2$ . O He melhora a condução de calor e estabiliza o plasma que se forma dentro da cavidade; o  $N_2$  é excitado e transfere a energia para o  $CO_2$ , o qual gera a emissão estimulada. O bombeamento é feito por descargas elétricas, fazendo com que o gás a pressão baixa forme um plasma estável (Hugo Marques 2009).

O laser de CO<sub>2</sub> atua no modo contínuo (CW), com um comprimento de onda de 10,6  $\mu\text{m}$ , podendo atingir uma potência de 100 kW ([Huang 2002](#)). Comercialmente os lasers de CO<sub>2</sub> estão disponíveis numa gama entre 1 e 20 kW. Apesar de a eficiência elétrica girar em torno de 12% ([Hugo Marques 2009](#)), os lasers de CO<sub>2</sub> são considerados os mais tradicionais no processamento a laser de aços, pois possuem elevada potência, e um nível de maturidade de processo elevado, boa qualidade de feixe em altas potências e em relação aos lasers Nd:YAG apresentam um menor investimento inicial. No entanto, o comprimento de onda impossibilita a transmissão por fibra ótica, necessitando de um sistema complexo de espelhos para a entrega do feixe, impedindo certas aplicações.

### **Laser Nd:YAG**

O laser de Nd:YAG possui como meio ativo um cristal sintético com uma estrutura de granada de ítrio e alumínio, dopado com iões de neodímio (Nd<sup>3+</sup>). O laser é gerado na transição de níveis de energia dos iões de Nd, que são excitados por lâmpadas ou lasers díodo. Pode operar em modo contínuo ou pulsado, sendo que em modo contínuo atinge potências até 20 kW. O comprimento de onda do laser é de 1,06  $\mu\text{m}$ , podendo ser transmitido por fibra ótica, a qual tem excelente transmissibilidade no infravermelho. A absorção no comprimento de onda de 1,06  $\mu\text{m}$  é muito maior que em 10,6  $\mu\text{m}$  (CO<sub>2</sub>) para metais e ligas metálicas, sendo particularmente apropriado para o processamento destes materiais. No entanto, os custos operacionais do laser Nd:YAG são consideravelmente superiores ao laser de CO<sub>2</sub> e a eficiência elétrica é de cerca de 2% ([Hugo Marques 2009](#)).

### **Laser Fibra**

Com o decorrer dos anos e o desenvolvimento da tecnologia das fontes de laser, procurou-se aliar a boa absorção do infravermelho com um aumento na eficiência elétrica e a diminuição dos custos de operação, surgindo desta pesquisa os chamados lasers de fibra.

Os Lasers de fibra são relativamente recentes no mercado, apresentando um investimento inicial similar ao laser de Nd:YAG, porém com custo de manutenção muito inferior e vida útil muito superior. Possuem uma eficiência elétrica em torno de 20%, tamanho compacto, requisitos de refrigeração reduzidos e funcionam em modo contínuo. Podem atingir potências até 50 kW, mas apenas estão disponíveis até 14 kW. ([Michaleris 1997](#))

O meio ativo está contido na própria fibra ótica, estando presente no núcleo da sílica vítrea dopada com itérbio (Yb) e revestida com sílica não dopada. O bombeamento é feito com o auxílio de um Laser de díodo o qual gera um feixe com um comprimento de onda de 1,07  $\mu\text{m}$  e alta qualidade de feixe. Essas características tornam o laser a fibra apropriado para a soldadura e o corte de metais.

#### **2.1.4 Gás de proteção**

A função principal do gás de proteção é reduzir o contacto da “piscina” soldada com a atmosfera. A proteção é necessária porque a temperaturas elevadas os metais podem ganhar defeitos, tais como a porosidade que leva á redução da qualidade da soldadura.

O gás de proteção também interfere com a forma da junta e a profundidade de penetração. Com a utilização do gás de proteção o processo de soldadura torna-se em geral mais fácil e de melhor qualidade. Para evitar o vapor é necessário ter em conta o ângulo do fluxo do gás de assistência/ proteção ( $30^{\circ}$  a  $60^{\circ}$ ) e o ponto de incidência do gás. ([Pastor 1999](#))

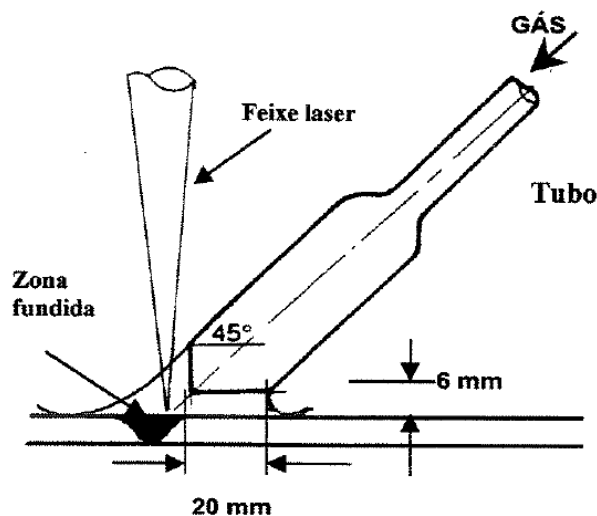


Figura 10- Posicionamento do bico de gás de proteção ideal para a realização da soldadura ([Pastor 1999](#))

Os principais gases utilizados e geralmente recomendados pelo fabricante são o Hélio (He), Azoto ( $N_2$ ) e Argônio (Ar) caso não seja necessário nenhuma proteção utiliza-se o  $CO_2$  por razões económicas. No caso de soldar ligas de alumínio deve-se usar Hélio ou Azoto dependendo da série da liga de alumínio em causa. ([Caiazza 2012](#))

### Hélio (He)

É o gás muito leve, que acaba por não permanecer na zona de soldadura por muito tempo sendo o seu consumo mais elevado em comparação com os outros gases. O hélio pode ser utilizado como complemento ao soldar com azoto.

É o melhor gás de proteção para soldar a laser de Fibra,  $CO_2$  e Nd:YAG devido ao seu elevado potencial de ionização, o que significa que ele pode absorver mais energia.

O seu uso é adequado para soldar alumínio (Al) e de ligas de alumínio sendo também usado para soldar aço inoxidável e materiais como titânio e zinco onde a qualidade de soldadura será severamente afetada pela oxidação.

### Azoto ( $N_2$ )

O azoto é um gás bem adequado para a soldadura de aço cromo-níquel. Ao soldar com Azoto é importante lembrar que a sua proteção diminui aquando utilizado na solda de aço inoxidável, diminuindo as frações de cromo-níquel.

Possui uma performance tão boa quanto o hélio em termos de prevenção da formação de plasma, mas do ponto de vista da qualidade de solda, pode causar fragilidade em certos aços devendo o seu uso ser tratado com precaução no caso de serem realizadas soldas onde o índice de qualidade seja bastante elevado.

Em relação á profundidade do cordão de soldadura, com a utilização do azoto pode atingir-se uma profundidade superior a 4 mm sendo importante salientar que as penetrações mais profundas são geralmente aplicadas em situações mais críticas onde a fragilidade da solda é vista como um potencial problema. Sendo assim quando o objetivo for soldar com uma maior penetração o gás que apresenta melhor eficiência para o processo é o hélio.

### **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Não é recomendável para soldas a laser quando o mesmo funciona em modo contínuo. Isto porque o CO<sub>2</sub> reage muito rapidamente com o feixe do laser degradando-o e formando uma indesejável “nuvem” de plasma. A “nuvem” é extremamente brilhante e pode radiar a luz do laser de volta, podendo danificar a focagem ótica. Acompanhado a isto pode ocorrer uma rápida perda de penetração e como consequência a obtenção de um comprimento de cordão de solda muito pequeno.

A utilização deste gás, como gás protetor, é possível apenas quando o laser opera em modo pulsado. A operação em modo pulsado de pequenos intervalos de tempo impede a formação de plasma, o que permite a obtenção de uma solda aceitável.

### **Árgon (Ar)**

É um gás inflamável e não tóxico. Pode ser usado como gás de proteção, sendo o mais pesado de todos eles, o seu uso é recomendado em dispositivos onde o gás pode ser extraído facilmente.

A sua presença excessiva no metal de trabalho durante a soldadura faz com que o mesmo se infiltre na poça de fusão durante a solidificação, dando origem ao aparecimento de pequenas bolhas/poros que fragilizam o material soldado.

Um dos factos que potencializa á deposição de uma quantidade excessiva de gás tem a ver com a contaminação da superfície a soldar com óleos, óxidos e resíduos de corte. Contudo, essa quantidade excessiva de gás pode ser reduzida com uma preparação/ limpeza prévia da superfície a soldar. ([TRUMPF Laser](#))

## **2.1.5 Vantagens e limitações da soldadura a laser**

A utilização da soldadura a laser teve um impacto extremamente importante no setor industrial. Precisão, repetibilidade, qualidade, alta velocidade e automação são as principais características presentes no processo e que fazem com que seja utilizado cada vez mais.

Com a utilização da soldadura a laser ocorre uma diminuição da ZAC, levando á redução das tensões térmicas que são introduzidas no material ocorrendo uma diminuição da distorção do mesmo.

Geralmente, é esperado um aumento extremo da dureza na zona de fusão, o que pode levar ao aparecimento de fissuras comprometendo a integridade da solda. Com a utilização de fio de enchimento conseguimos uma soldadura mais homogênea e reduzir a dureza no interior da zona de fusão.

Comparando a soldadura a laser com os outros processos de soldadura obtemos maiores velocidades, cordões de soldadura com melhor aspeto, para além de ser possível a união de materiais de ligas e espessuras diferentes. É uma técnica apropriada para soldadura com penetração total numa única etapa sem nunca ocorrer contacto entre o laser e o material, logo não existe desgaste da ferramenta.

A aquisição de um laser representa um investimento inicial bastante grande, sendo apenas compensado com a alta produtividade e melhorias na qualidade de soldadura.

Uma das maiores desvantagens tem a ver com a eficiência energética (diferença entre a potência consumida e a potência de luz gerada) do laser que é bastante reduzida. Lasers de Nd:YAG possuem eficiência de 1 a 3%, enquanto lasers de CO<sub>2</sub> possuem de 5 a 10%. Eficiências maiores podem ser obtidas usando outros tipos de laser, como por exemplo, laser a fibra, que possui eficiência em torno de 20 a 30%, ou laser de díodo direto, que possui eficiência em torno de 25 a 40%.

A utilização do laser necessita de certos cuidados por parte do operador, pois as altas intensidades dos lasers podem provocar danos aos olhos e queimaduras na pele. Portanto é necessário, que o ambiente para soldadura esteja bem protegido e isolado, como em qualquer solda por arco. A vaporização do material durante a soldagem pode gerar fumos potencialmente perigosos, portanto o processo de soldadura a laser necessita de um mecanismo de extração de gases apropriado ([Brust 2007](#)) ([Dawes 1992](#)).

## 2.2 Alumínio e suas ligas

O alumínio é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre, representando mais de 8% e pode ser encontrado combinado com outros elementos (Figura 11).

Presentemente produz-se cerca de 24 milhões de toneladas de alumínio por ano ([Aluminum 2014](#)), sendo este valor treze vezes superior ao de há 60 anos atrás mostrando a importância deste metal nos dias de hoje. ([G. Totten et al. 2003](#))

A sua aplicação vai desde obras de arte, utensílios domésticos até a mais avançada tecnologia. A obtenção de alumínio pode ser realizada por via primária e secundária (reciclagem), através da recuperação de sucata. ([Davis 1993](#))



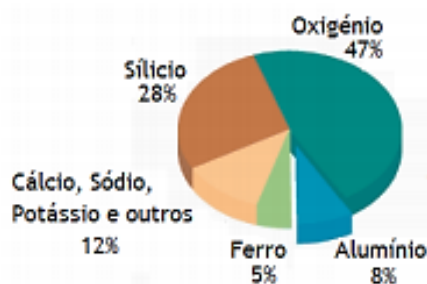


Figura 11- a) Alumínio representa 8% da crosta terrestre, figura adaptada de ([Davis 1993](#)).

A produção primária do alumínio ocorre em três etapas: a extração de bauxite das minas a produção de alumina (óxido de alumínio) a partir da transformação de bauxite utilizando o processo químico de Bayer e por fim a produção do alumínio através do método de Hall-Héroult.

O processo químico de Bayer consiste em dissolver a alumina em soda cáustica, sendo as partículas insolúveis posteriormente filtradas. O hidróxido de alumínio é posteriormente precipitado, lavado e seco e a solução de soda caustica reciclada. Após calcinação obtém-se a alumina em pó. A alumina é dissolvida num banho de criolite e fluoreto de alumínio e após eletrólise (método de Hall-Héroult) o alumínio é produzido no cátodo e extraído por diferenças de densidade. ([Davis 1993](#))

Para se obter uma tonelada de alumínio são necessárias quatro toneladas de bauxite. ([Aluminum 2014](#))

O uso intensivo do alumínio deve-se ao desenvolvimento de um elevado número de ligas de alumínio com composições químicas, características e aplicações diferentes. Hoje em dia devido á elevada procura da relação característica-preço, as ligas de alumínio substituem em muitas aplicações outros materiais como é o caso dos aços.

Neste subcapítulo será feita uma breve introdução sobre as principais características do alumínio, da nomenclatura destas ligas e dos respetivos tratamentos térmicos.

### 2.2.1 Características do alumínio

As características mecânicas e físicas do alumínio e das suas ligas dependem da sua composição química e dos tratamentos a que são submetidos.

O alumínio no seu estado puro comercial apresenta apenas uma reduzida taxa de impurezas as quais são ferro e silício. Segundo a *Aluminum Association* o alumínio puro pode apresentar uma taxa de pureza de 99% até 99,99%. ([Aluminum 2014](#))

As características presentes no alumínio puro são as seguintes: elevada condutividade térmica, baixa resistência mecânica, baixa densidade, baixo ponto de fusão e elevada resistência a corrosão. É caracterizado também por ser um material facilmente conformável, maquinado e soldado. Para além disso não é toxico, e acima de tudo reciclável. ([M.M.M.Martins 2008](#))

## 2.2.2 Ligas do alumínio

Uma das principais artes da metalurgia consiste em criar ligas (combinações) a partir de um metal base através da adição de determinadas quantidades de outros elementos de modo a que sejam obtidas melhorias ou modificações em algumas propriedades do material base tais como tensão de cedência e dureza.

No caso do alumínio ocorreram adições de elementos como – ferro, magnésio, silício, zinco, cobre, níquel, crómio, tungsténio, zircónio, boro, titânio, lítio e estanho.

As ligas de alumínio podem ser divididas em duas classes. As ligas para fundição, que são diretamente fundidas para a sua forma final. A outra classe é a das ligas utilizadas para trabalho mecânico as quais são fundidas em formato de lingotes para depois ser usada em várias aplicações.

Neste trabalho apenas será feita uma breve referência as ligas de trabalho pois serão as aplicadas.

Dentro da classe das ligas de trabalho, as mesmas dividem-se em duas categorias: as ligas tratadas termicamente e as ligas não tratadas termicamente. Nas ligas tratadas termicamente as operações de aquecimento e arrefecimento, a temperaturas adequadas, permitem alterações nas propriedades mecânicas da liga, como é o caso da dureza. Nas ligas não tratáveis termicamente tal como o próprio nome indica, o endurecimento da mesma é obtido com o arrefecimento a frio (à temperatura ambiente).

## 2.2.3 Nomenclatura das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas de acordo com o elemento ou elementos mais abundantes na liga. Existem 8 series diferentes de liga para trabalho mecânico. Cada serie é composta por quatro algarismos identificativos sendo que o primeiro identifica a serie á qual a liga pertence. O segundo algarismo identifica eventuais alterações ou o grau de pureza. E os últimos dois algarismos identificam a percentagem de alumínio presente na liga.

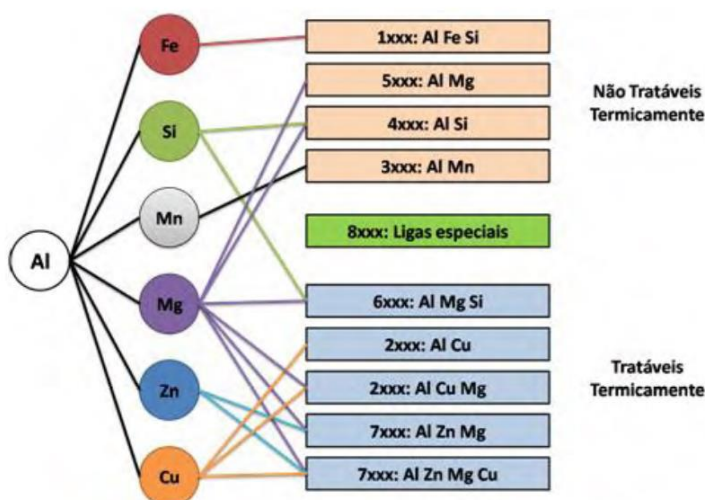


Figura 12- Correspondência entre as diferentes ligas de alumínio e respectivos elementos de liga. figura adaptada de ([Davis 1993](#))

## 2.2.4 Nomenclatura das condições metalúrgicas das ligas de alumínio

Para além da nomenclatura que designa a composição da liga também existe uma codificação para identificar a condição metalúrgica em que a liga foi conseguida. Essa nomenclatura foi criada pela *Aluminum Association*. Segundo este tipo de codificação existem cinco condições que são apresentadas na tabela seguinte. ([Aluminum 2014](#))

Tabela 1- Condições metalúrgicas presentes na liga de alumínio. tabela adaptada de ([Davis 1993](#))

“F”	Bruto de fábrica
“O”	Recozimento
“H”	Encruamento
“W”	Solubilizado
“T”	Tratamento termicamente para obter um estado estável para além de F, O, ou H.

De todas as condições metalúrgicas irá ser dado um enfase especial as condições T6 e H111.

### Condição metalúrgica T6

A condição metalúrgica “T” diz respeito a ligas que são tratadas termicamente, com ou sem endurecimento por deformação suplementar para a obtenção de um estado estabilizado. Esta condição é dividida em 10 classes as quais são apresentadas com a letra “T” seguida de um algarismo de 1 até 10. Como já foi referido anteriormente apenas será feita uma pequena abordagem á condição T6 a qual consiste num tratamento térmico de solubilização, seguido de um envelhecimento artificial

### Condição metalúrgica H111

Nesta condição metalúrgica o produto é endurecido por tratamento mecânico (deformação plástica), com ou sem tratamento térmico posterior para controle de grau de endurecimento (encruamento). ([Fraga 2009](#)) Seguidamente á letra vêm três números para especificar a condição de tratamento no caso da condição H111, a mesma significa que as propriedades mecânicas do material foram obtidas exclusivamente por trabalho a frio, sem nenhum tratamento suplementar.

### Liga 5xxx

Também chamada de liga Al-Mg (magnésio). As ligas desta serie consistem em ligas que podem ter combinações até 5% pois além deste valor a estabilidade da liga decresce. O magnésio é um elemento bastante eficaz e com uma ampla aplicação em várias ligas, sendo

responsável pelo aumento da resistência mecânica. As ligas desta serie são as que apresentam melhores características mecânicas entre as ligas não tratáveis.

Estas ligas são caracterizadas também por:

- Boa soldabilidade;
- Excelente resistência á corrosão mesmos nas regiões soldadas;
- Boa conformação a frio; ([BRAY 1992; ANDERSON 2005](#))

### **Liga 6xxx**

Consiste numa liga que apresenta como principais elementos o magnésio e o silício Mg Si. A precipitação controlada destes dois elementos conduz a que a liga obtenha um aumento da dureza e da resistência mecânica. A liga 6xxx é uma liga tratada termicamente, apresentando boas características para a maquinagem, soldabilidade e resistência a corrosão.

Esta liga apresenta um grande interesse por parte da indústria científica pois para além das propriedades da mesma poderem ser melhoradas a partir de tratamentos térmicos, cerca de 90% das ligas de alumínio extrudidas pertencem á liga 6xxx. ([M. Cai et al 2004](#))

## **2.3 Tailor Welded Blanks (TWB)**

A indústria automóvel tem sofrido grandes alterações nos últimos anos, sendo a maioria delas causadas pelas políticas ambientais que cada vez mais restringem a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Este facto influenciou a industria automóvel a desenvolver e aplicar novas tecnologias, melhorando o rendimento e a aerodinâmica dos automóveis, levando á redução do consumo de combustível em mais de 25%.

No entanto ainda se pretendia reduzir o consumo tendo-se avançado para a redução do peso do automóvel. Esta redução tem sido obtida através da utilização de aços de alta resistência mecânica, emprego de metais não-ferrosos, plásticos, fibras e a melhoria das tecnologias da fabricação do automóvel entre as quais se destaca a alteração da carroçaria. ([ANJOS 1999](#))

Na indústria convencional a montagem da carroçaria processa-se através da união de vários componentes que tinham sido previamente estampados. A ligação entre os vários componentes era obtida ou a partir de soldadura por pontos ou a laser, sendo esta última cada vez mais utilizada.

Se o objetivo passa-se por criar um determinado componente formado por chapas de características distintas, de modo a suportar solicitações diferentes de forma otimizada, era necessário primeiro conformar individualmente cada um dos elementos e, só depois, uni-los através de soldadura (Figura 13).

De outra forma, esse processo pode ser realizado a partir da produção de painéis compostos, os quais podem ser feitos com a utilização de planificados constituídos por chapas de diferentes espessuras, materiais ou revestimentos, que são soldadas antes da operação de conformação (Figura 13). A este processo é dado o nome de *Tailor Welded Blanks* (TWB) ou *Tailored Blanks*.

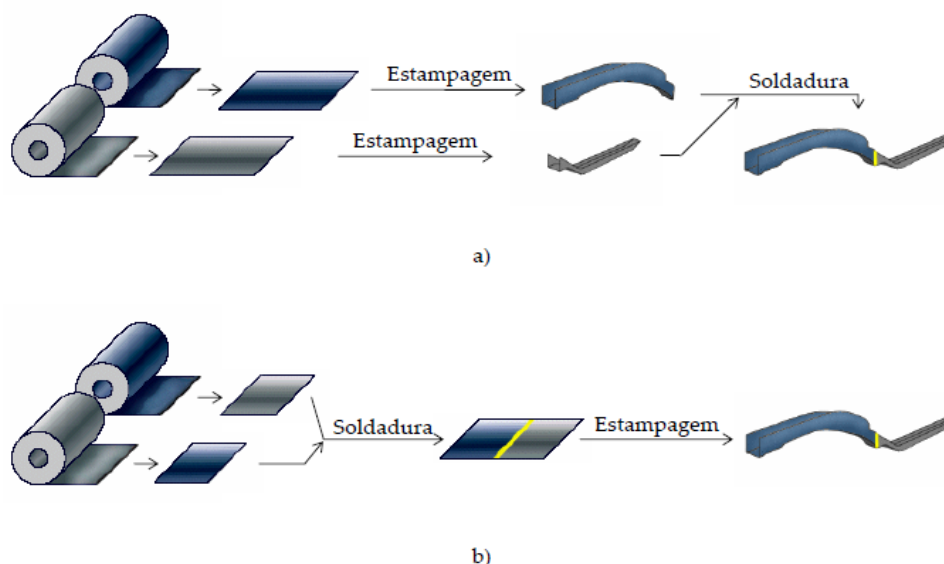


Figura 13 - Comparação esquemática do processo de fabrico de componentes compostos por chapas com características diferentes: a) Método de fabrico convencional; b) Método de fabrico aplicando TWB. ([Baptista 2006](#))

Com a utilização desta metodologia é obtida a redução imediata do peso em comparação com a solução de empregar apenas um só material e uma só espessura, uma vez que só se emprega a massa precisamente necessária em cada zona do painel a estampar. A Figura 14 representa vários exemplos onde são utilizados TWB compostos com chapas de diferentes espessuras.

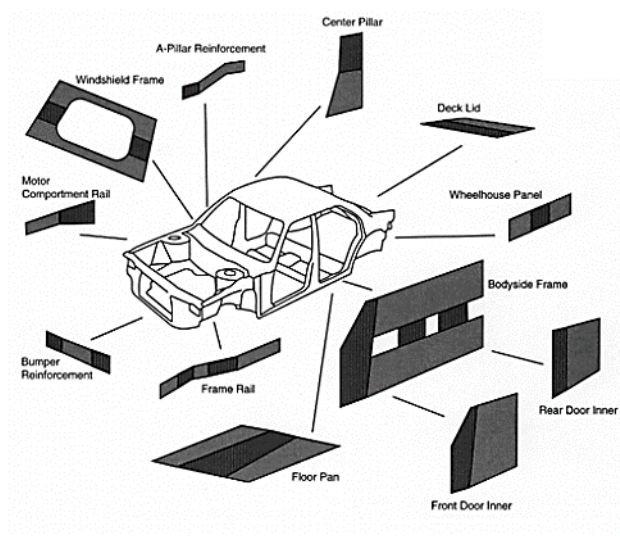


Figura 14- Varias aplicações dos TWB. ([Brad Kinsey 2001](#))

De um modo geral, os TWB podem ser classificados a partir do posicionamento e do cordão de soldadura aplicado nas chapas. Existem três tipos de uniões, a retilínea que é a mais

comum e mais usada (Figura 15 a e b), as não-retilíneas (Figura 15 c) e a *patchwork* sendo esta mais específica e complexa. Esta última é utilizada quando se precisa de reforçar um local específico da peça a estampar, esse reforço é feito a partir da sobreposição da chapa de reforço na chapa base a conformar (Figura 15 d). A união das chapas pode ser feita a partir de adesivos ou através de soldadura por pontos [[Petitjean et al. 2001](#)].

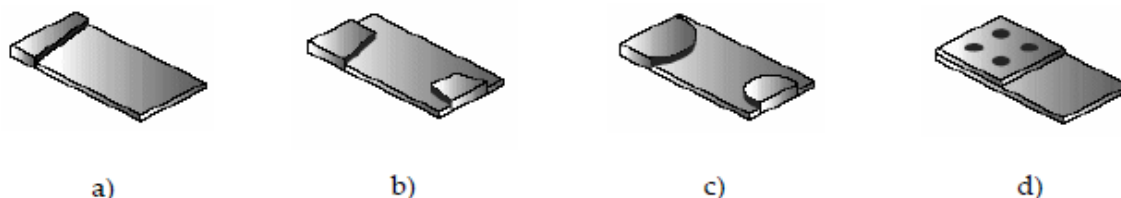


Figura 15- Tipos de uniões de chapas mais comuns para o processo de TWB ([Baptista 2006](#))

Com a utilização dos TWB ocorre uma redução drástica do número de peças do automóvel levando a que a produção do automóvel seja obtido em menos etapas, reduzindo os custos associados á produção de ferramentas, montagem e desperdício de material.

Em 1998 Trogolo e Dieffenbach realizaram um estudo de comparação do custo/material utilizado para a produção de um painel interior de uma porta de automóvel recorrendo ao método convencional e aos TWBs. Com este estudo conclui-se que o painel produzido por TWB é 17.8% mais barato e pesa menos 9,6% que o modelo contruído pelo método convencional. ([Trogolo 1998](#))

A estampagem de TWB pode ser realizada nas mesmas condições em que eram estampadas as peças obtidas da maneira convencional, tendo a particularidade de vez de termos várias ferramentas de estampagem para os diferentes componentes que depois eram agregados, apenas é necessária uma única ferramenta. O único aspeto a ter em atenção na estampagem dos TWB tem a ver com existência de uma sobreespessura na zona do cordão de soldadura que poderá provocar um maior desgaste. Para evitar este tipo de problemas na construção da ferramenta deve ter em conta o posicionamento do cordão de soldadura. ([Ulrich e Groche 2002](#))

Mesmo já tendo passado mais de 50 anos desde o aparecimento dos TWBs ainda existem muitas dificuldades na execução do processo, sendo de destacar os seguintes aspetos:

- A menor formabilidade do planificado, devido à redução de ductilidade na zona afetada pelo calor ZAC;
- Existência de grandes dificuldades em soldar ligas de alumínio, devido ao aparecimento de fissuras, porosidade e refletividade do material;
- A necessidade em garantir uma elevada precisão no alinhamento das chapas a soldar a laser;



- O acabamento superficial apresentado pelos painéis devido à presença da mordedura do cordão de soldadura, podendo esta ser atenuado com a adição do material;

Para além das complexidades que envolve o processo, a sua introdução no mercado tem sido em certo modo retardada devido aos elevados custos com os equipamentos responsáveis pelo corte e soldadura.

Após serem apresentados os prós/contras é difícil estimar, com rigor, a totalidade dos benefícios indiretos que resultam da aplicação de TWB. Se por um lado obtém-se um menor desperdícios de material, e aumento do desempenho global do automóvel, também é necessário um investimento avultado, o que torna o processo inviável para pequenas produções.

Para combater de certo modo o investimento avultado para a produção dos TWB a indústria automóvel Norte Americana organizou-se de maneira a que as siderúrgicas comesçassem elas próprias a produção dos TWB, de maneira a que a matéria-prima que era posta á disponibilidade das empresas já vinha com as características pretendidas, isto é a matéria-prima vinha em forma de bobines de chapa já eram compostas por materiais e espessuras diferentes que eram previamente soldados ([Belforte 2002](#)).

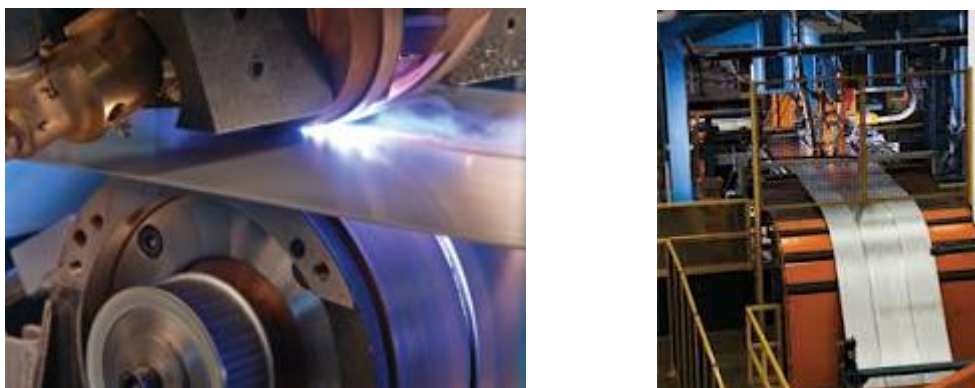


Figura 16- Preparação das bobines de chapa.

Na Europa a Honda foi a pioneira na realização de um painel conformado a partir de TWB o qual foi realizado em 1967 ([Rooks 2001](#)), tendo na altura partido por parte da própria Honda o patenteamento do método de produção [Mesquita *et al.* 1999]. O processo de produção realizado consistia em um TWB constituído por 5 elementos de três materiais diferentes sendo a união entre eles realizada a TIG. Com seria de esperar para além da grande dificuldade na execução da soldadura dos cinco elementos o principal entrave encontrado tinha a ver com a elevada distorção apresentada pelas chapas devido á soldadura a TIG acabando o processo por ser um fracasso.

Foram necessários quase dez anos (1979) até que a Volvo conseguisse pela primeira vez a produção de componentes automóveis mais propriamente o suporte do motor a partir do processo de TWB sendo que desta vez a união das chapas era realizada por *Mash Seam Weld* ([Mesquita et al. 1999](#)).



Figura 17- União de dois componentes por Mash Seam Weld

Mas é necessário esperar até 1985 para que a Thyssen produzisse o primeiro TWB soldado a laser o qual veio a integrar o Audi 80, sendo a Audi a primeira marca a nível mundial a utilizar uma carroçaria obtida a partir TWBs, sendo esta produzida em aço galvanizado. ([Eurico Assunção 2008](#))

Para fazer frente as novas tendências de construir carroçarias mais leves foi criado em 1994 um consórcio intitulado de ULSAB (Ultra Light Stell Auto Body) formado por 35 empresas siderúrgicas de 18 países diferentes. O consórcio encomendou à *Porsche Engineering* o desenvolvimento da carroçaria que fosse mais leve, mas sem prejudicar a resistência mecânica, rigidez e resistência ao impacto. O projeto baseou-se na utilização maciça de aços de alta resistência aplicado TWBs. Passados 4 anos do início do projeto foram obtidos os seguintes resultados:

- Redução do peso em 25%;
- Aumento da rigidez á torção em 60%;
- Aumento da rigidez á dobragem em 48%; ([Baptista 2006](#))

A utilização de TWB progrediu de uma situação quase “embrionária” no final da década de 80 e princípio da década de 90, em que existiam poucas dezenas de aplicações, para um ponto em que a inclusão desta técnica começa a ser propagada a toda a indústria.

O uso deste tipo de esboços tem tido, nos últimos 20 anos, um papel muito importante, ligado à utilização das novas famílias de aços de alta e muito alta resistência, para incrementar os níveis de resistência das estruturas dos automóveis e, ao mesmo tempo, reduzir ou, pelo menos, minimizar o aumento do peso destas. As grandes coletividades siderúrgicas ligados à produção de aço tiveram (e continuam a ter) um papel preponderante na evolução do conceito e aplicabilidade dos TWB. Com efeito, o aumento da utilização de ligas de alumínio e magnésio na construção das carroçarias, bem como o lançamento de automóveis (ou protótipos) com estruturas integralmente produzidas em ligas de alumínio, originou uma reação integral das empresas produtoras de aço de modo a travar a perda de importância do aço face a estes materiais de menor densidade ([The Engineer 2004](#)).

Mesmo que intensificado o uso percentual de aços de elevada resistência, não é fácil citar muitos exemplos de automóveis da geração atual cujo peso seja menor à geração precedente. Sendo a afirmação anterior justificado devido ao facto de que cada vez mais ser prioritário construir estruturas mais resistentes para melhor proteger os ocupantes do carro, bem como o aumento significativo dos equipamentos de segurança, depois de contruído o carro estes parâmetros fazem com que seja absorvido quase a totalidade da redução de peso permitida pela introdução de TWB e de novos materiais.



Um exemplo desta afirmação tem a ver com o modelo Volvo S40 onde a estrutura do modelo lançado em 1996 pesava 266 kg, enquanto que, na geração lançada uns anos depois (2004) o valor subiu para 311 kg, mesmo incluindo mais de 50% dos componentes produzidos em aço de elevada resistência ([The Engineer 2004](#)).

Apesar do esforço de desenvolvimento colocado no estudo de TWB compostos por ligas de alumínio, a sua aplicação continua a ser pontual, pois prevalecem dificuldades em unir ligas de alumínio através de processos de soldadura por fusão, nomeadamente devido à elevada refletividade do material, à tendência para a fissuração a quente, à criação de porosidade e à redução de resistência mecânica na ZAC ([Mesquita et al. 1999](#)). Além disso, a própria conformação das ligas de alumínio é mais problemática que na maioria dos aços, nomeadamente pela reduzida ductilidade do cordão e pela presença de defeitos na soldadura.

### 3 Metodologia Experimental

#### 3.1 Apresentação da EDAETECH- Engenharia e Tecnologia, S.A

Fundada em 2002 com sede em Fão, concelho de Esposende a EDAETECH conforme a Figura 18, tem como administrador Eng.º Ventura Belinho e Dr. Rui Viana como Diretor Administrativo e Financeiro é uma empresa da área de Engenharia e Tecnologia automóvel / aeronáutica.



Figura 18: Sede da empresa EDAETECH

O seu campo de trabalho é o desenvolvimento, fabrico de protótipos, assim como a produção de pequenas séries de componentes metálicos para incorporar nos veículos automóveis e seus motores.

Pretende também, prestar serviços de Engenharia, quer na criação de produtos e ferramentas, quer no desenvolvimento de novas soluções e novos processos de fabricação.

De entre os serviços prestados destacam-se o corte a laser 3D o qual permite garantir uma elevada qualidade de corte bem como uma elevada precisão e rapidez na execução em peças após a estampagem.

Também executa maquinagem a alta velocidade de 3 e 5 eixos, bem como corte de laser a 2D, soldadura/tratamento térmico por laser, quinagem CNC, modelação e estampagem entre outros.

A empresa é constituída por cerca de 60 colaboradores e divide-se em 4 sectores:

Sector administrativo e financeiro;

Sector comercial;

Sector industrial;

Sector da qualidade;

De entre os vários sectores destacam-se o sector industrial mais propriamente o departamento da engenharia (Figura 19) no qual foi realizado o estágio tendo como orientador o Eng.º António Morais.



Figura 19 - Departamento da Engenharia

Também evidenciar o envolvimento da EDAETECH em vários projetos de investigação internacional, todo o relevo atingido pela empresa é fruto de uma aposta na qualidade, no rigor, na inovação, investigação, desenvolvimento e diferenciação levando a EDAETECH a ser uma empresa prestigiada no sector da metalúrgica e metalomecânica.

### 3.2 Equipamento Utilizado

Sendo este trabalho realizado na EDAETECH foi necessário uma análise de maneira a que fosse possível verificar quais as ferramentas que estariam disponíveis para este trabalho. Assim foi verificou-se, que estariam disponíveis para a execução dos ensaios os seguintes equipamentos:

### **Trumpf Laser Cell 1005**

Este equipamento tem um modo de funcionamento do tipo CO<sub>2</sub> é uma máquina de corte e soldadura 3D com uma potência máxima de 4KW.



Figura 20- Trumpf Laser Cell 1005.

### **MCLAVA**

Equipamento com um modo de funcionamento do tipo Fibra com sistema 3D de corte e uma potência máxima de 2000 w.

### **Bilboa**

Este equipamento tem um modo de funcionamento do tipo fibra, sendo uma máquina composta por 3 eixos com uma potência máxima de 400W.



Figura 21- Bilboa

Após apresentados os três equipamentos disponíveis e uma breve análise dos mesmos concluiu-se que a escolha deveria recair para um laser do tipo Fibra ou Nd YAG, pois é possível realizar cordões de soldadura com uma ZAC (zona afetada termicamente) reduzida visto que este tipo de lasers é caracterizado por um ponto focal substancialmente menor em comparação com os lasers tipo CO<sub>2</sub>.

Sendo assim apenas restavam duas opções que passaria pela utilização do laser MCLAVA ou Bilboa. Infelizmente não foi possível realizar os ensaios na MCLAVA devido á elevada carga de trabalho não permitia que os ensaios fossem realizados, sendo os ensaios realizados na Bilboa. Mesmo realizando os ensaios na Bilboa, esta apresenta um inconveniente que tinha a ver com a reduzida potência (apenas 400W), a qual fica muito aquém da desejada para o processo de soldadura segundo Ancona. ([Ancona et al 2005](#)). Mesmos assim a escolha foi para a Bilboa pois entendeu-se que tratava de um projeto mais aliciente visto a soldadura com o processo de laser de CO<sub>2</sub> encontra-se bastante mais desenvolvida que para os outros dois tipos de laser retratados anteriormente.

### 3.3 Plano e ensaios

Depois de realizada uma breve pesquisa bibliográfica a otimização do processo de soldadura foi dividido em duas etapas:

- **Primeira etapa:** Determinação dos parâmetros adequados para a realização da soldadura.
- **Segunda etapa:** Realização de vários ensaios para comprovar a qualidade da solda.

Para cada tipo de ensaios irão existir as seguintes amostra:

Tabela 2- Plano amostral de ensaios

Material		Al 5083 H111		Al 6083 T6	
Espessura (mm)		0,8	1	0,8	1
Amostras	1	x			
	2		x		
	3			x	
	4				x
	5	x	x		
	6			x	x
	7	x		x	
	8		x		x

### 3.4 Material Utilizado

Para a realização dos ensaios foram utilizadas chapas finas de alumínio AL5083 no estado H111 e AL6082 no estado T6 nas espessuras de 0,8 e 1mm.

De seguida são apresentadas as composições químicas dos materiais utilizados:

Tabela 3- Composição química do Al5083 H111

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Min	-	-	-	0.40	4.0	0.05	-	-	Restante
Max	0.40	0.40	0.10	1.0	4.9	0.25	0.25	0.15	Restante
Atual	0.20	0.32	0.04	0.58	4.4	0.08	0.02	0.02	Restante

A AL5083 é uma liga de alumínio para construção mecânica, que tem como principal elemento o magnésio. No estado H111, esta liga é sujeita a um tratamento de recozimento de recristalização que permite um aumento da sua ductilidade e da sua estabilidade dimensional.

Esta liga não apresenta problemas de fragilidade a quente sendo possível a sua soldadura por fusão com uma perda mínima da resistência mecânica (não apresenta problemas de fissura a quente).

A Tabela 4 apresenta algumas propriedades mecânicas da liga.

Tabela 4- Propriedade da Liga Al 5083 H111.

Propriedades	Valor
Densidade	2,66g/cm <sup>3</sup>
Dureza Vickers	77
Tensão Máxima	290MPa
Tensão de cedência	145MPa
Alongamento á rotura	22%
Módulo de Elasticidade	70,3GPa
Condutividade Térmica	117W/m.K

Já a liga Al6083 é a liga do grupo que possui maior resistência mecânica. Esta liga apresenta um excesso de silício em relação ao necessário para formar o composto  $Mg_2Si$ .

Tabela 5- Composição química do Al6082 T6

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Min	0.7	-	-	0.40	0.6	-	-	-	Restante
Max	1.3	0.5	0.10	1.0	1.2	0.25	0.20	0.10	Restante
Atual	1	0.38	0.08	0.52	0.7	0.02	0.05	0.02	Restante

As propriedades mecânicas máximas desta liga são conseguidas na condição metalúrgica T6, onde ocorre um tratamento térmico de solubilidade, seguido de um envelhecimento artificial.

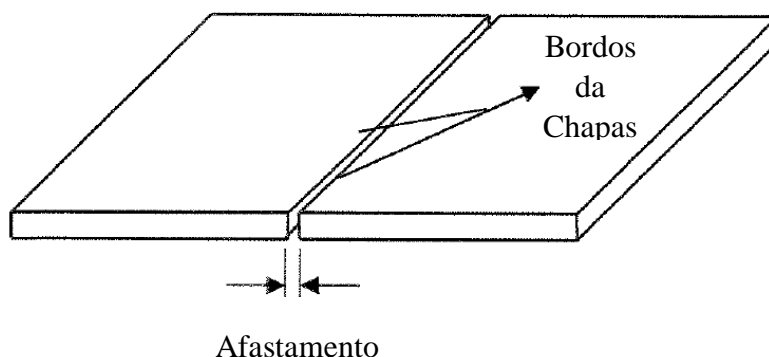
Tabela 6-Propriedade Mecânicas do Al6082 T6.

Propriedades	Valor
Densidade	2,70g/cm <sup>3</sup>
Dureza Vickers	95
Tensão Máxima	310MPa
Tensão de cedência	250MPa
Alongamento á rotura	10%
Módulo de Elasticidade	70,3GPa
Condutividade Térmica	170W/m.K

### 3.5 Parâmetros do processo

Inicialmente foi feito um ensaio com um conjunto de parâmetros que vão de encontro com a informação encontrada na literatura. A partir desse ensaio foram feitas alterações em parâmetros como velocidade de deslocamento do laser, aceleração, posição do ponto focal, caudal do gás de proteção, etc., até chegar a resultados satisfatórios.

Para a realização dos testes de soldadura foi projetado um gabari de soldadura para melhorar os resultados da mesma. Com a construção deste gabari pretendesse reduzir ao máximo o afastamento dos provetes a soldar.



Para a eliminação do plasma que se forma durante a soldadura, foi utilizado como gás de assistência Hélio, sendo introduzido por meio de um bico injetor como pode ser visualizado na Figura 23. Para a fixação das chapas de alumínio, foi desenvolvido um suporte que garantisse as seguintes condições indispensáveis: o alinhamento das chapas o qual é garantido com a introdução de cavilhas na mesa de soldadura; devido aos provetes serem tão finos com a passagem do laser poderá ocorrer algum empeno das chapas levando a que não se obtenha um cordão alinhado, para combater esse problema serão colocados duas barras guias que para além de ajudar na fixação das chapas também irão exercer pressão para combater o empeno causado pelo laser.

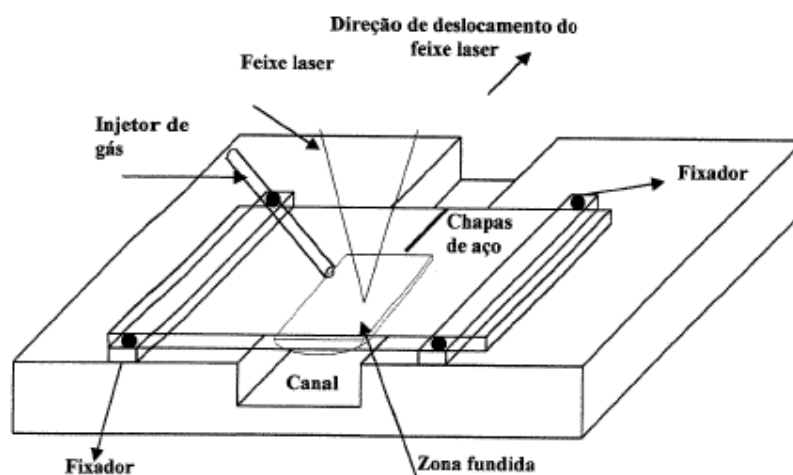


Figura 23- Ilustração do suporte de fixação a construir.

Para a elaboração do gabari de soldadura recorreu-se ao programa de modelação 3D CATIAV5 sendo possível ver na figura seguinte o gabari modelado no CATIA e o produto final.



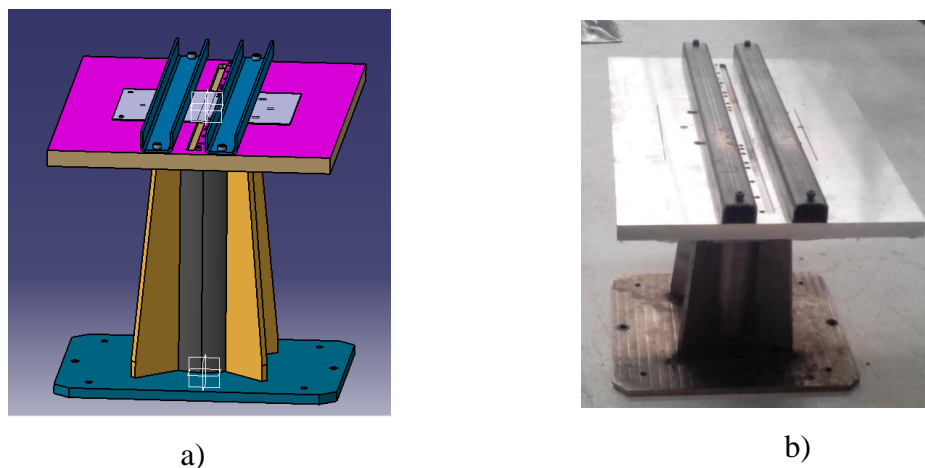


Figura 24- a) Gabari modelado no CATIAV5 b) Gabari final.

### 3.6 Ensaios experimentais do TWB

Para a determinação da qualidade da soldadura foram realizados vários ensaios que são apresentados de seguida.

#### 3.6.1 Ensaios de dobragem

O ensaio de dobragem é um ensaio qualitativo utilizado para a análise da conformação de um segmento reto de secção circular, quadrada, retangular ou tubular. Os ensaios fornecem uma indicação qualitativa da ductilidade do material e consistem na dobra do material que deverá estar assentado em dois apoios devidamente afastados a uma distância específica. Através de um punção é aplicada uma força perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido o ângulo desejado.

No final a zona da dobragem não deverá apresentar trincas ou fissuras para que o provete passe no ensaio.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos segunda a norma ASME IX sendo utilizado o seguinte equipamento.

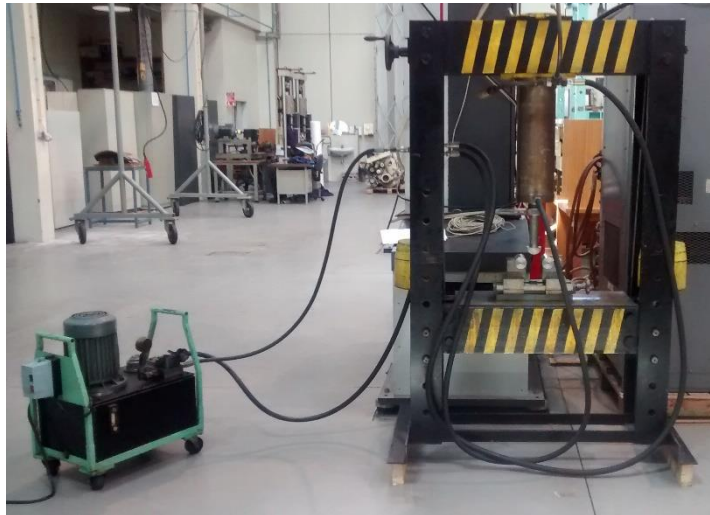


Figura 25- Equipamento de dobragem com guiamento utilizado nos ensaios.

As dimensões dos provetes são as seguintes:

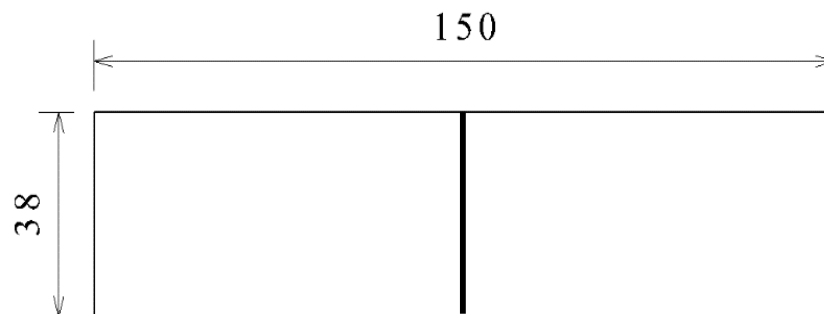


Figura 26 - Dimensões dos provetes para o ensaio de dobragem.

### 3.6.2 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram divididos em duas fases:

Numa primeira fase foram realizados ensaios a provetes homogêneos, isto é provetes sem cordões de soldadura. Os ensaios realizados segundo a norma ASTM E 8M-04 onde os provetes apresentam as seguintes dimensões.

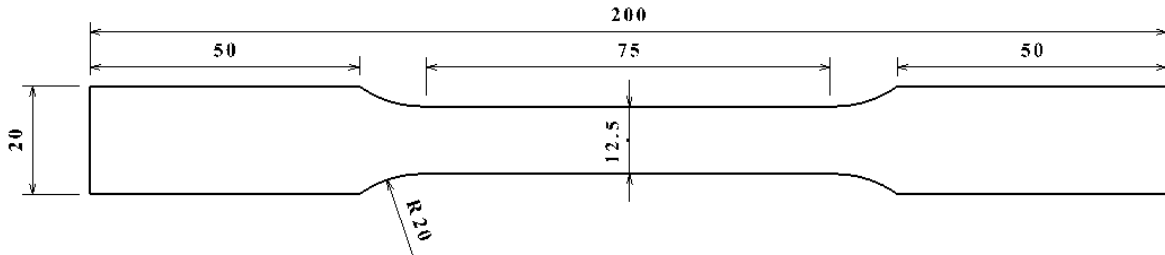


Figura 27- Dimensões do provete segundo norma ASTM E 8M-04.

Na segunda fase foram realizados ensaios de tração sendo estes soldados. O cordão de soldadura foi realizado longitudinalmente no centro do provete as dimensões dos mesmos seguiram a norma ASME IX e são apresentados de seguida.

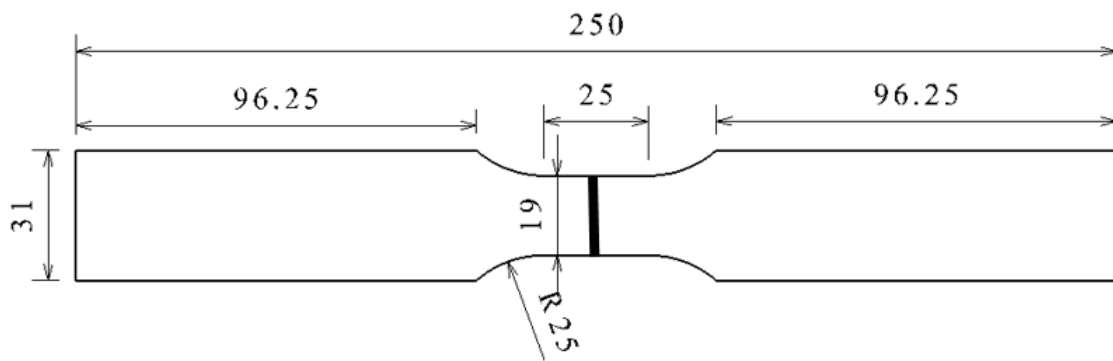


Figura 28- Dimensões do provete segunda a norma ASME IX

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Adesivos da FEUP onde foi utilizado o equipamento Instron Series 3367.

Em todos os ensaios foi aplicado um deslocamento do travessão de 5mm/min



Figura 29- Máquina de ensaios de tração utilizada - Instron Series 3367

### 3.6.3 Ensaios de Formabilidade

Para a obtenção da Curva Limite de Embutidura CLE recorreu-se aos ensaios de Nakajima, em que as chapas a ensaiar são submetidos uma série de testes com provetes de larguras variáveis entre os 25 e os 200 mm. No caso dos ensaios realizados no âmbito deste estudo foram apenas usadas larguras entre os 25 e os 100 mm. Antes do ensaio e correspondente deformação os provetes são marcados com uma grelha de círculos, que permite uma leitura posterior das deformações obtidas. O ensaio e consequente deformação dos provetes deve ocorrer até se verificar estrição localizada ou rotura. ([Malheiro 2012](#))

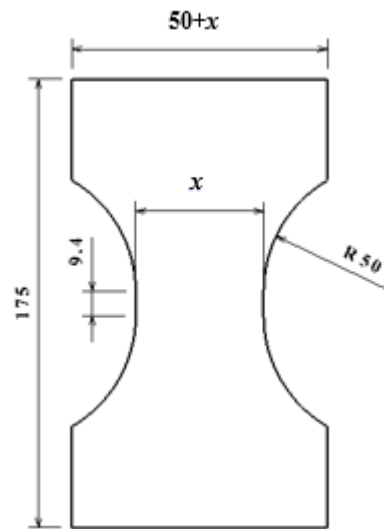


Figura 30- Dimensão dos provetes para o ensaio de Nakajima

O ensaio consiste num equipamento composto por um punção hemisférico, uma matriz e um cerra chapas, onde ocorre a colocação do provete centrado com o punção, sendo de seguida fechado o cerra chapas e aplicada uma força para evitar qualquer escorregamento por parte do material. De seguida ocorre o avanço do punção o qual irá provocar a deformação dos provetes.

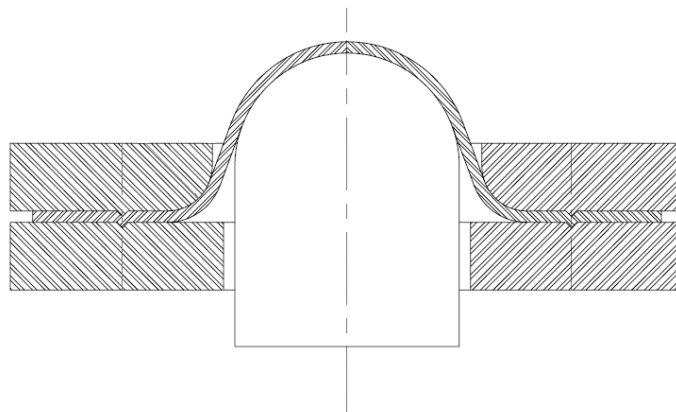


Figura 31- Esquema da ferramenta utilizada para a execução dos ensaios

As deformações das chapas podem ser medidas a partir da Correlação Digital de Imagem ou com a colocação de grelhas. Nos ensaios realizados foram utilizadas as grelhas de círculos com o diâmetro de 1 mm.

A gravação dos provetes foi feita a partir da marcação eletroquímica (“Electrochemical marking”).

O método de marcação eletroquímica consistiu em deixar uma marca no material através da gravação de uma grelha de círculos bem definida que servira de referência para medição de deformações conseguidas com os ensaios de caracterização de materiais.

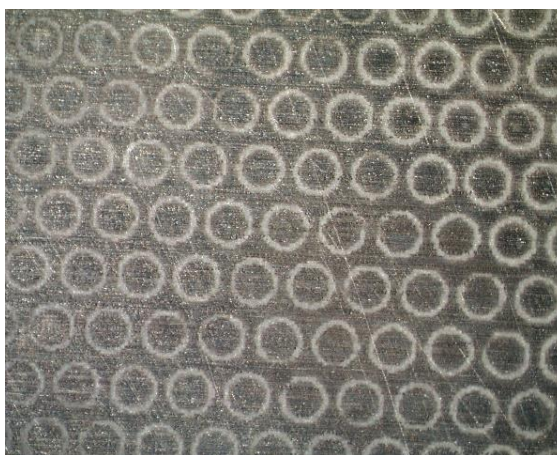


Figura 32- Grelha de círculos aplicada no material em estudo.

Nesta gravação foi utilizada uma folha eletricamente não condutora com um padrão de círculos com a dimensão de 1 mm (Figura 32). Esta folha deve ser colocada sobre o material que se pretende marcar e sobre o mesmo foi colocado o feltro absorvente que foi previamente encharcado com eletrólito de forma homogênea. De seguida é passado várias vezes o elétrodo em forma de rolo.

Quando a marcação estiver com o aspeto desejado procedeu-se á neutralização do eletrólito por aplicação de uma solução neutralizadora.

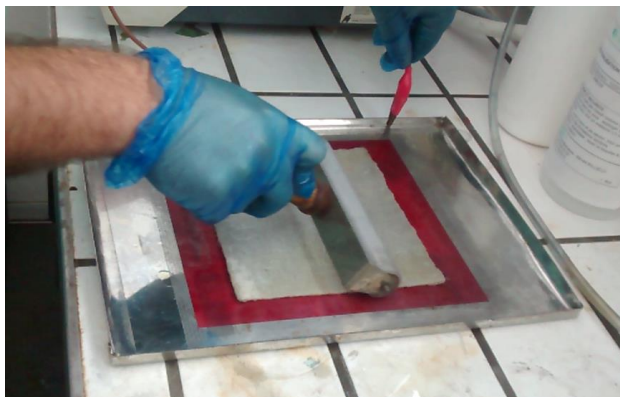


Figura 33 - Marcação eletroquímica de grelhas de círculos.

Após realizados os ensaios para os diferentes provetes, obtém-se valores das deformações no momento de estricção, que podem ser representados no espaço das deformações principais. (Vaz 2013)

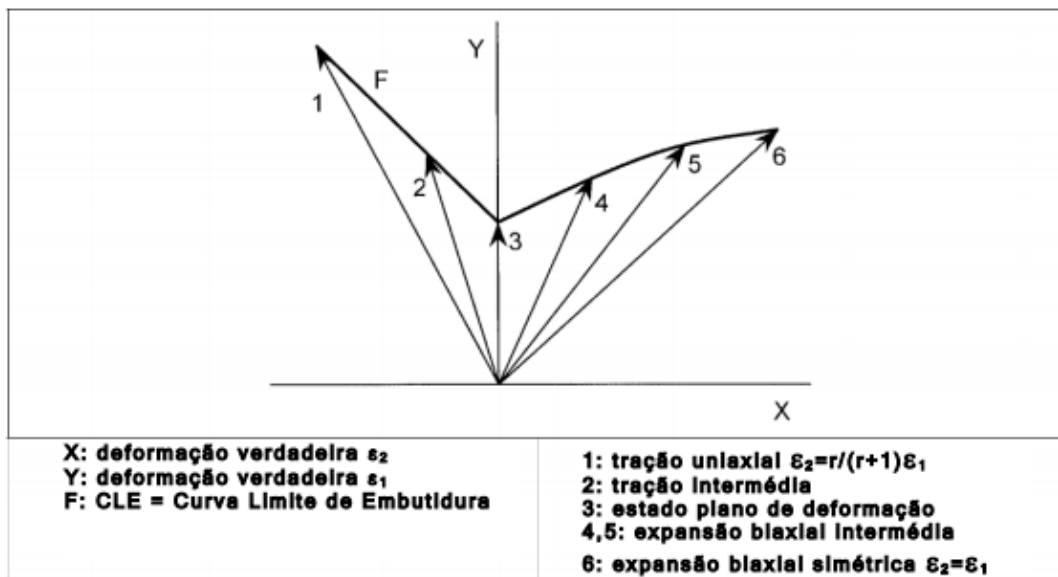


Figura 34- Determinação da CLE usando diferente trajetórias de deformação. (Vaz 2013)

### 3.6.4 Ensaios Metalográficos

Para a identificar a presença de poros e/ou defeitos lineares internos foi realizada uma análise metalográfica.

A preparação das amostras foi feita no Laboratório de Ensaios Tecnológicos no Departamento de Engenharia mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a análise foi realizada no Laboratório de Materialografia do INEGI.

Para a análise metalográfica foram preparadas amostra retiradas dos cordões de solda. As amostras foram cortadas com um disco de corte diamantado e com líquido de refrigeração. Este corte foi feito muito lentamente pois como estávamos a falar de chapas muito finas, era requerido muito cuidado pois queríamos amostras sem empeno.

Depois de ser efetuado o corte foi necessário montar as amostra em resina epoxídica para o polimento ter os efeitos desejados de forma a ser possível visualizar a penetração da soldadura e posterior análise microscópica, para garantir que a amostra ficassem colocadas corretamente recorreu-se ao uso de umas pinças de posicionamento.



Figura 35- Amostras preparadas em resina de Epoxídica.

Depois de montadas as amostras procedeu-se ao polimento da superfície a analisar. Sendo este procedimento conseguido em duas etapas:

- Pré-polimento (mais grosseiro);
- Polimento;

O pré-polimento é realizado com lixas de polimento lubrificadas em água e o polimento é realizado com lixas/panos de alumina. O polimento foi realizado com o auxílio de um porta amostras de maneira a garantir que no final do procedimento o plano de visualização estivesse paralelo a base isto é sem inclinação, pois as amostras iriam ser utilizadas para os ensaios de microdureza. Tanto o pré-polimento como o polimento foram realizados em discos de rotação a 300 r.p.m no caso do pré-polimento e 150 r.p.m no polimento.



Figura 36- Struers RotoPol-21



De modo a melhorar a qualidade da amostra as granulometrias das lixas são aumentadas sucessivamente sendo que de lixa para lixa era efetuada uma rotação de 90° nas amostras.

Para o pré-polimento foram utilizadas lixas de CSi (carboneto de silício) com as granulometrias de 80, 180, 320 e 800. Em relação ao polimento final o mesmo foi feito com pano abrasivo de diamante com granulometria de 3 e 4 µm.

Por fim é necessário o uso de um reagente ativo que no caso de ligas de alumínio, foi utilizado o ácido Hf 2%.

Após preparadas as amostra, foram observadas através de um Microscópio Ótico Poland Olympus PMG3 do Laboratório de Metalografia do INEGI.



Figura 37- Microscópio Poland Olympus PMG3.

### 3.6.5 Análise da Microdureza

Como referido anteriormente para a realização dos ensaios de microdureza foram utilizadas as mesmas amostras empregadas na análise metalográfica. O equipamento utilizado foi o HMV-2000 SHIMADZU, o qual possui dispositivos para a realização do ensaio de microdureza Vickers, utilizando um penetrador piramidal com objetiva.

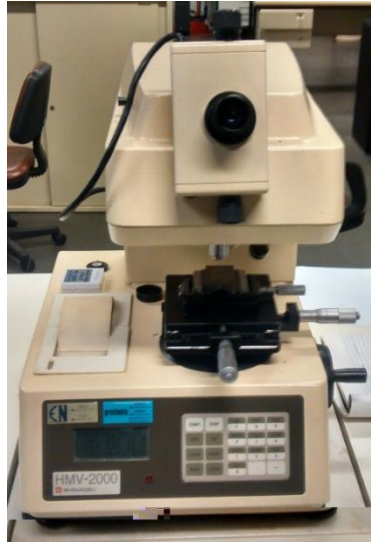


Figura 38 - HMV-2000 SHIMADZU

A figura seguinte mostra como foram realizadas as medidas da microdureza, sendo realizada uma medida transversal ao longo da amostra tendo em atenção que na ZAC será realizada uma medida longitudinal.

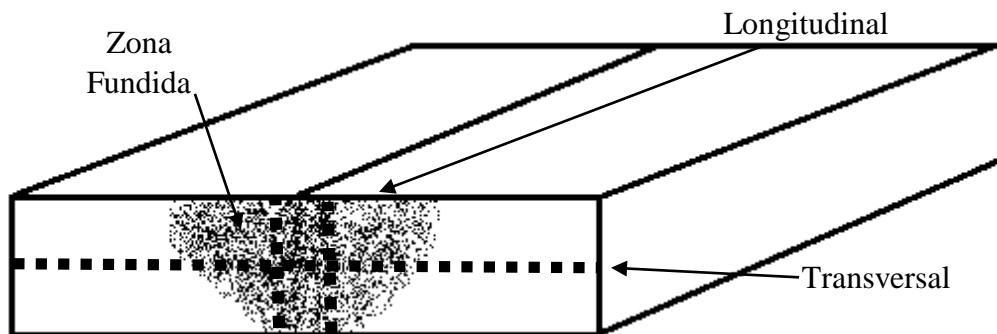


Figura 39- Localização das regiões onde será medida a microdureza.

## 4 Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios.

Inicialmente foram realizadas soldaduras em mais de 30 provetes para a obtenção dos parâmetros adequados que iriam ser aplicados ao longo dos ensaios. Visto que não era possível realizar ensaios metalográficos em todos os provetes foi feito uma seleção dos mesmos tendo em conta os seguintes aspetos:

- Acabamento superficial;
- Penetração total do material soldado;
- Acabamento por a parte posterior do cordão;
- Obtenção de um cordão de soldadura contínuo, entre outros;

De seguida são apresentados alguns casos de provetes que foram encontrados com defeitos anteriormente referidos:

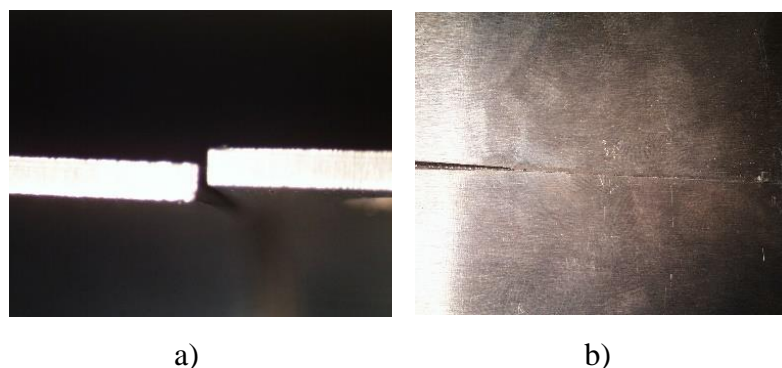


Figura 40 - a) Desalinhamento dos provetes após a soldadura; b) Falta de penetração.

A Figura 40 b) representa um dos defeitos que tinha a ver com a perda de penetração ao longo da soldadura do provete. Esta perda de penetração é um dos casos que demonstra a complexidade do processo pois esta falta de penetração tinha a ver com um pequeno desnível

da mesa de soldadura o qual só foi descoberto depois de muito ensaios. Isto demonstra que qualquer descuido leva ao fracasso do ensaio.

Assim sendo para cada tipo de amostras foi utilizado os seguintes parâmetros de soldadura:

Tabela 7 - Plano de Amostras para os ensaios.

Parâmetros	Amostra nº	Material		Espessura (mm)		Posicionamento do foco (mm)	Velocidade (mm/s)
		Al 5083 H111	Al 6082 T6	0,8	10		
<b>I</b>	1	X			X	-0.5	40
<b>II</b>	2	X		X		0	50
<b>III</b>	3	X		X	X	0,25	40
<b>IV</b>	4		X		X	-1	20
<b>V</b>	5		X	X		-0.25	20
<b>VI</b>	6		X	X	X	-0.5	20
<b>VII</b>	7	X	X		X	-1	20
<b>VIII</b>	8	X	X	X		-0.5	25

Os parâmetros de caudal de gás e potencial foram mantidos constantes ao longo de todos os ensaios e tomaram os valores de Q= 20l/min e P=400W

#### 4.1 Ensaios de Dobragem

Os ensaios de dobragem foram realizados quer pelo lado da face quer da raiz. Com a visualização da figura seguinte constata-se que estamos perante duas ligas com comportamentos bastantes diferentes a quando o contacto com o punção.












(a)

(b)

Figura 41- Comportamento dos provetes em contacto com o Punção do material Al5083H11(a) e Al6083T6(b)

Tabela 8 - Ensaio de dobragem obtidos por soldadora a Laser

Esp. (mm)	Material		
	Al 5083 H111	Al 6082 T6	Al 5083 H111 Al 6083 T6
1			
0,8			
1/0,8			

Após a apresentação dos resultados contata-se que apenas os provetes do material Al5083H11 não evidenciam fissuras após uma análise no microscópio. Também é possível ver que nos provetes que possuem diferentes espessuras e materiais ocorreu um descentramento do cordão de soldadura durante a dobragem devido a um lado do provete ser mais resistente á dobragem que o outro.

Já nos provetes da liga Al6083 T6 foi possível detetar que quando entravam em contacto com o punção mantinham a sua forma original, havendo apenas dobragem do cordão levando ao surgimento de fissuras que provocavam a quebra dos provete pelo cordão de soldadura. Com a visualização ao microscópio da zona do cordão de soldadura após o ensaio foi possível visualizar a existência de vários poros, os quais justificam o comportamento dos provetes.

## 4.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados segundo a metodologia apresentada anteriormente, sendo apresentados os resultados pela seguinte ordem. Numa primeira fase será apresentado o ensaio realizado para a caracterização do material base sendo depois apresentados os resultados obtidos para os provetes soldados desse mesmo material com as diferentes espessuras.

### Liga AL 5083 H11

A Tabela 9 apresenta a características da liga AL 5083 H111.

Tabela 9- Característica do material base Al5083 H111

Carga Máxima (N)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Ruptura (MPa)	Extensão total na ruptura [%]
3972.18	162.17	317,77	19.39

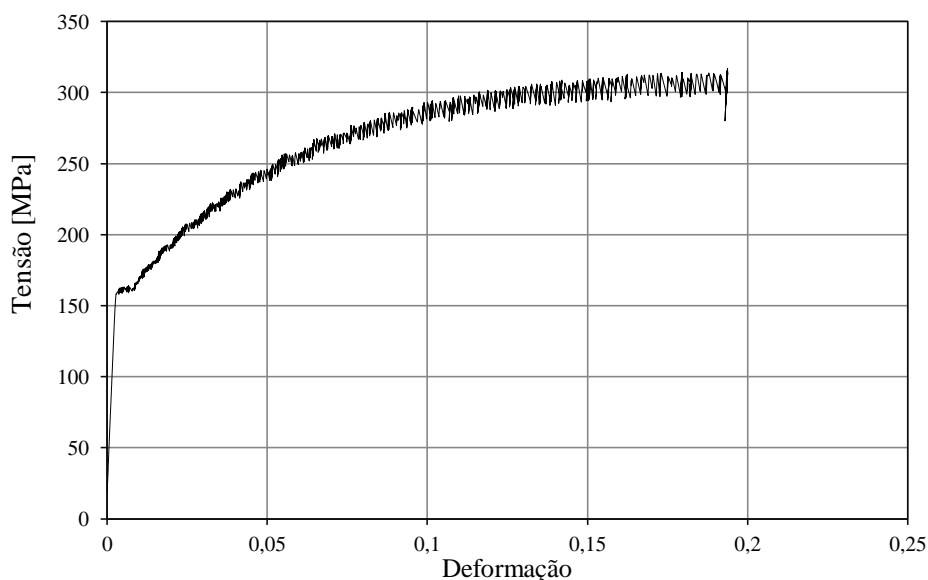


Figura 42- Gráfico tensão deformação do material Al5083 H111.

No gráfico tensão deformação do material Al5083 H111 é possível visualizar o efeito de Portevin-Le Chatelier o qual é característico das ligas 5000 e que consiste na perseguição das deslocamentos pelos átomos de soluto dando origem a uma curva tensão deformação com uma aspeto serrilhado. ([Herdawandi Halim et al 2007](#))



Figura 43- Extensão após rutura.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados.

Tabela 10-Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al5083 H111

Espessura (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Rutura (MPa)	Extensão após rotura [%]	Eficiência do cordão de soldadura (%)
1	4173.06	168.04	219.63	3.7	69.12
0,8	3512.64	127.24	184.88	4.6	58.18
1/0,8	4100.33	150.23	215.81	6.22	67.91

## Liga Al6082 T6

Tabela 11- Característica do material base Al6082 T6

Carga Máxima (N)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Rutura (MPa)	Extensão total na rotura [%]
4358.66	331.86	348.69	15.82

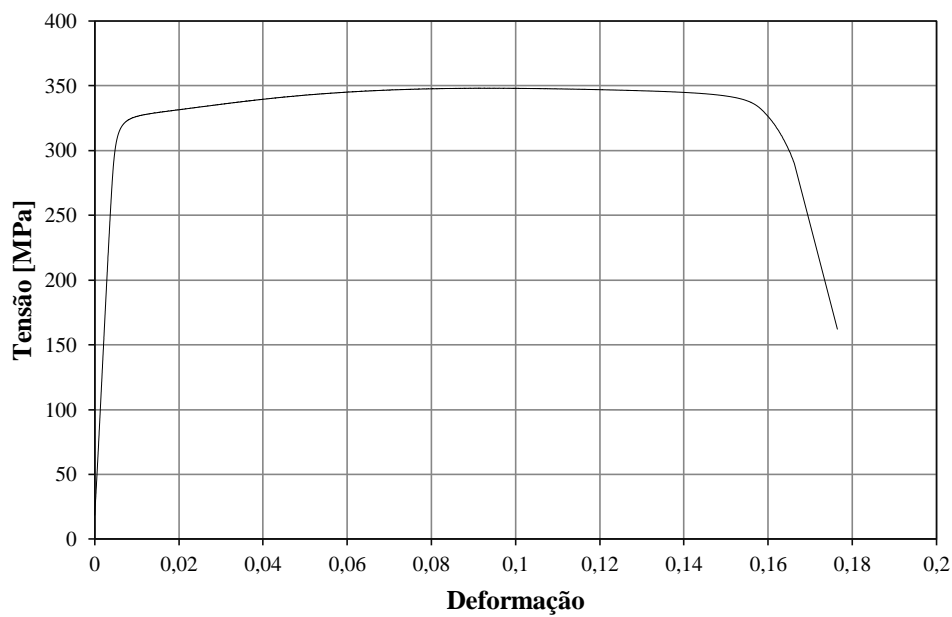


Figura 44- Gráfico tensão deformação do material Al6082 T6.



Figura 45- Extensão após rutura.

Tabela 12- Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al6082 T6

Espessura (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Rutura (MPa)	Extensão total na rotura [%]	Eficiência do cordão de soldadura (%)
1	4142.43	145.21	218.02	2.4	62.53
0,8	3590.52	127.53	188.97	2.9	54.19
1/0,8	3929.51	138.13	206.82	2.7	59.31



### Junção da liga Al5083 H111 com Al6082 T6

Na tabela 13 encontra-se os resultados obtidos para a junção dos dois materiais na espessura de 0,8mm.

Tabela 13-Resultados dos ensaios de tração dos provetes soldados no material Al5083 H111 com Al 6082 T6

Espessura (mm)	Carga Máxima (N)	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Rutura (MPa)	Extensão total na rotura [%]
0.8	3512.89	129.94	184.89	3.6

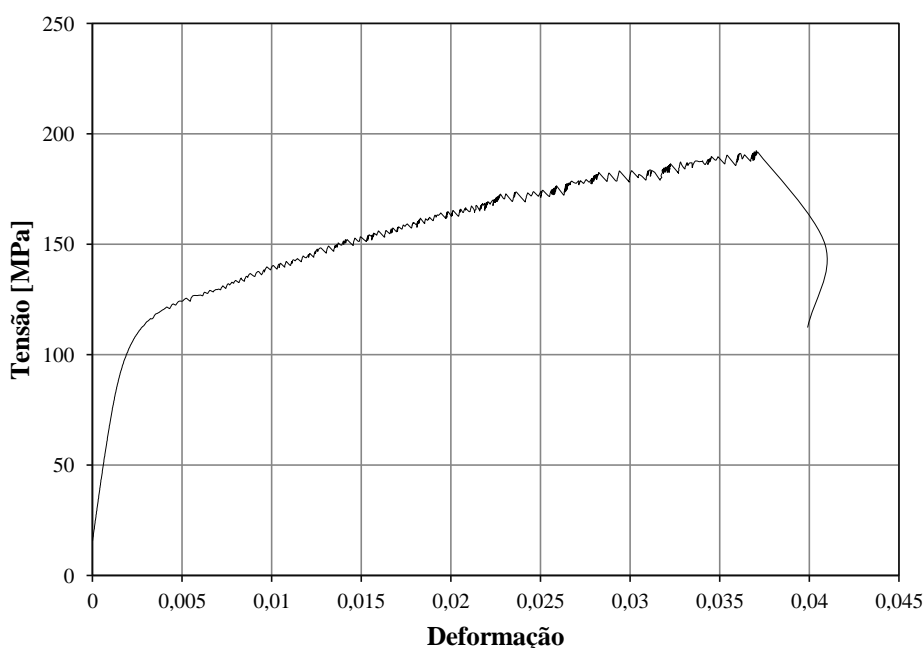


Figura 46- Gráfico tensão deformação do provete composto pelos materiais Al6082 T6 e Al5083 H11

Após apresentados todos os ensaios de tração constatasse os que os provetes soldados acabaram todos por partir na zona do cordão de soldadura devido ao facto de ser possível visualizar no cordão de soldadura um rechupe que provoca uma redução da secção resistente do provete e se acrescentarmos a esse rechupe o facto de estarem presentes demasiados poros os quais são visíveis após a rutura ainda diminui ainda mais a secção resistente, levando a que esta região seja mais frágil em comparação com o material base

É possível visualizar que a extensão após rutura dos provetes soldados é muito reduzida em comparação com a do material base.





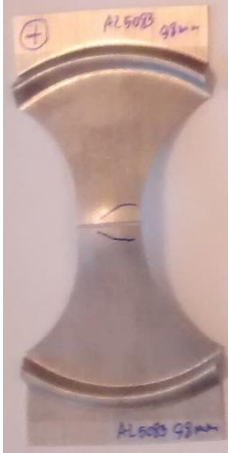



O cálculo da eficiência do cordão de soldadura foi feito a partir da razão da tensão de rutura do material base com a do provete soldado e para estes ensaios foi obtido uma eficiência entre os 54 e os 70% mostrando desde já a falta de homogeneidade e qualidade na soldadura obtida

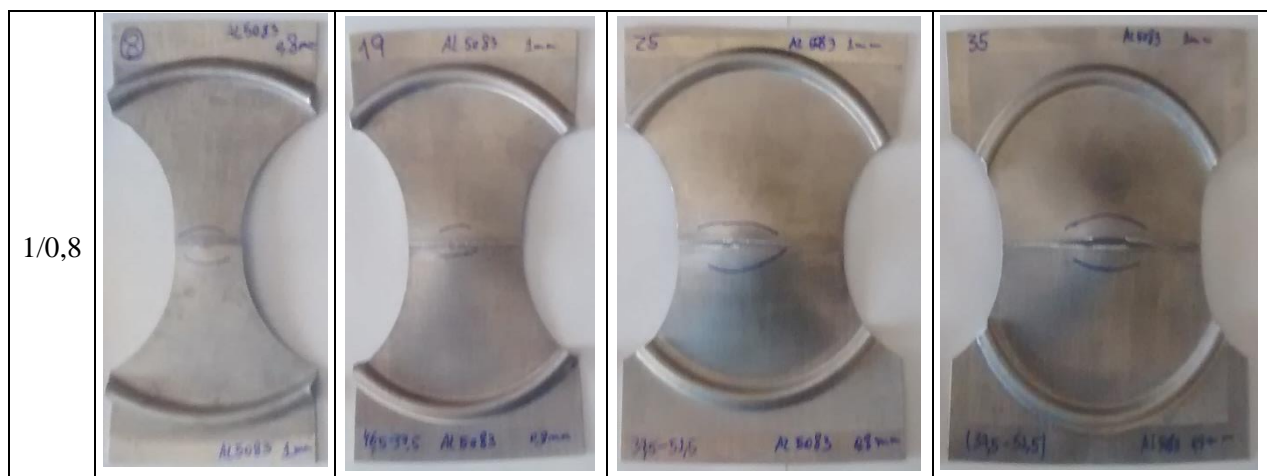
Em termos da tensão de cedência em relação á liga 5083 tanto os provetes de material base como os soldados apresentam valores muito próximos já na liga 6082 o valore da tensão de cedência é em media metade do valor obtido para o material base (provetes homogéneo).

### 4.3 Ensaios de formabilidade

Os resultados dos ensaios de Nakajima realizados no material Al5083 H111 estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de formabilidade.

Esp. (mm)	Material Al 5083 H111			
	Provetes 25 mm	Provetes 50 mm	Provetes 75 mm	Provetes 100 mm
1				
0,8				



Os resultados obtidos mostram uma grande incapacidade de se obterem deformações mínimas para o componente ensaiado, em virtude da rotura prévia na zona do cordão de soldadura. Em alguns casos a simples fixação do cerra-chapas era suficiente para a ocorrência de rotura no cordão de soldadura. A figura seguinte apresenta um desses cassos, é de salientar que as imagens não são apresentadas á mesma escala.

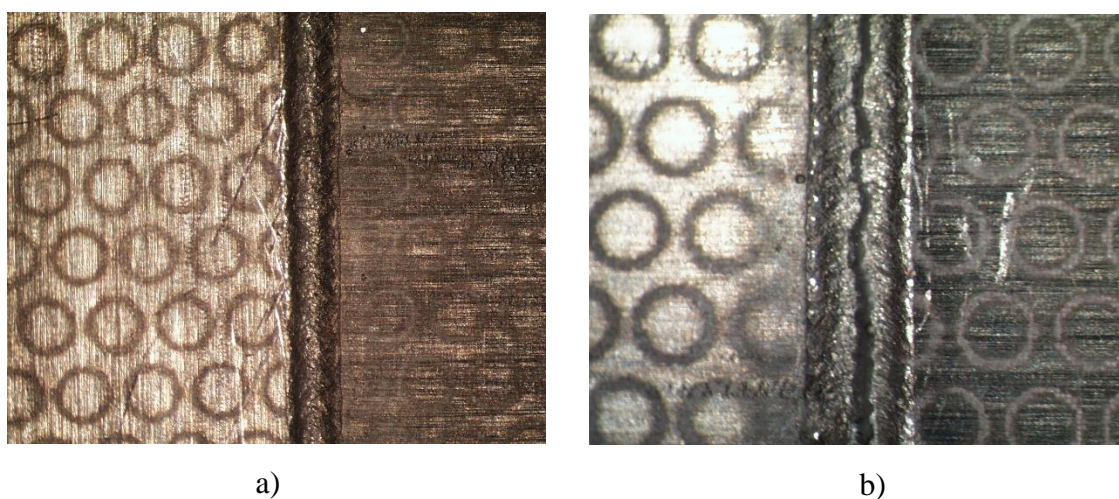


Figura 47- Dimensão do cordão de soldadura antes (a) e após fecho (b) do cerra-chapas.

Nos provetes onde a rotura não ocorreu com o fechar do cerra-chapas, o deslocamento vertical até á rotura também foi em média cerca de 10 mm.



Figura 48-Vista lateral dos provetes, mostrando a baixa formabilidade obtida no cordão de soldadura.

Como já tinha sido referido nos resultados dos ensaios de tração também é possível visualizar na zona da fenda um número excessivo de poros, favorecendo ainda mais propagação da fenda ao longo do cordão.

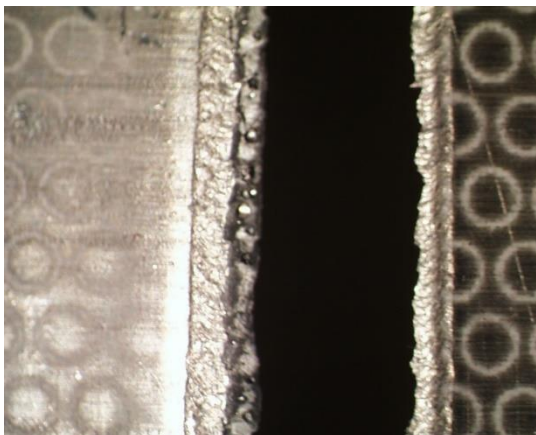


Figura 49- Visualização de poros na zona do cordão de soldadura.

Na Figura 50 apresenta-se um gráfico com a CLE (Curva Limite de Embutidura) correspondente a estudos efetuados por R Safdarian. ([R Safdarian et al 2014](#)) de um alumínio da série 5000 realizado com material homogêneo, podendo compreender-se os limites de formabilidade esperados, com valores de deformação acima de 0.2. Os ensaios realizados forneceram valores de deformação residuais, que neste gráfico estão em níveis baixos, assinalados na zona da elipse a vermelho no gráfico Figura 50.

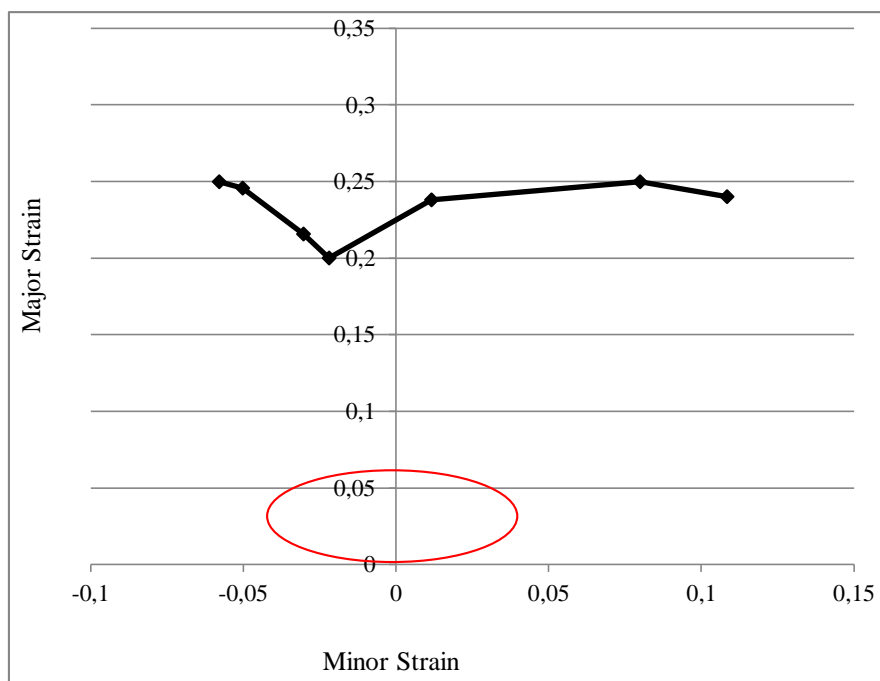


Figura 50- CLE para o material Al 5182. ([R Safdarian et al 2014](#))



Após analisada a CLE anterior comprovam-se a má qualidade da soldadura e a necessidade de investigação e desenvolvimentos adicionais quanto aos parâmetros de soldadura, de modo a obterem-se cordões com capacidade de deformação aceitáveis.

#### 4.4 Análise Microestrutural

As amostras foram obtidas segundo o processo referenciado anteriormente. De seguida são apresentadas varias montagens de fotos tiradas na secção transversal do cordão. A suspeita de porosidade na inspeção visual, é confirmada com a visualização de poros nas amostras sendo que em alguns casos esses poros representam uma dimensão de mais de metade do cordão de soldadura.

Com a visualização das figuras seguintes é de fácil identificação a zona do metal fundido e a sua transição para o metal base onde é possível ver um crescimento exagerado do grão, com a formação de dendrites as quais são as primeiras a solidificar com a passagem do laser.

A essa zona onde ocorre o crescimento do grão é chamado zona afetado pelo calor (ZAC). Nas amostras seguintes não é possível ver com muita nitidez a estrutura do material base visto qua a mesma é muito difícil de ser atacada, em muitos casos ao forçar a visualização do metal base com sucessivos ataques ocorre a danificação da zona do cordão que consiste na principal visualização deste trabalho.

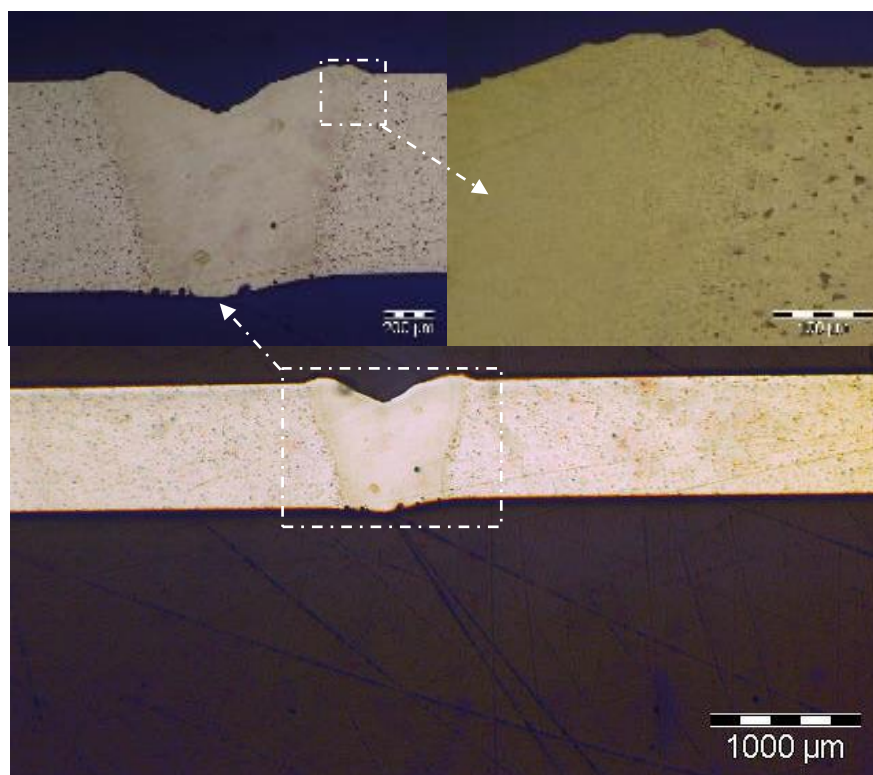


Figura 51 - Secção transversal do material Al5083 H111 na espessura de 1mm.

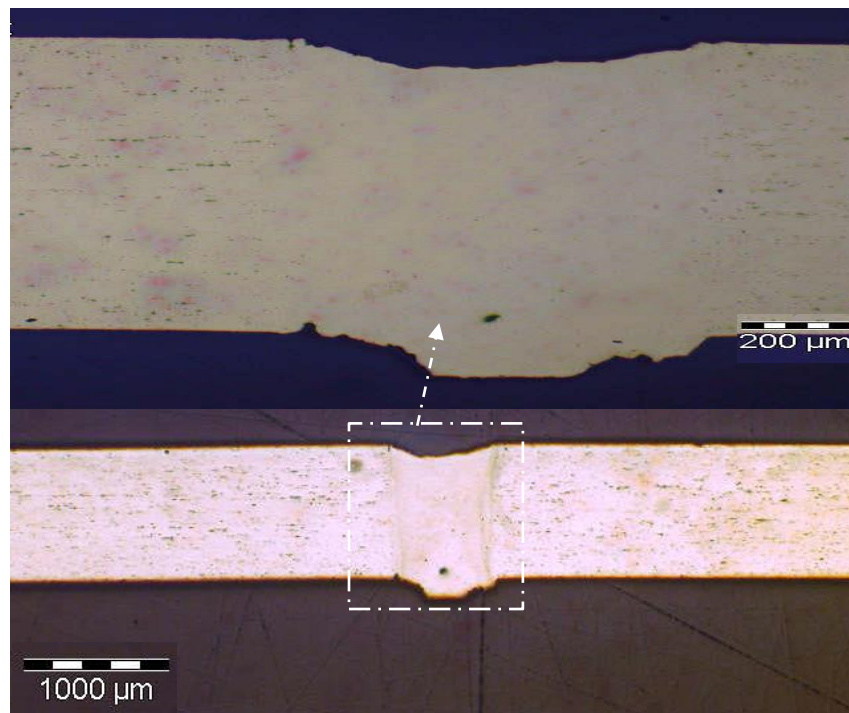


Figura 53- Secção transversal do material Al5083 H111 na espessura de 0,8mm.

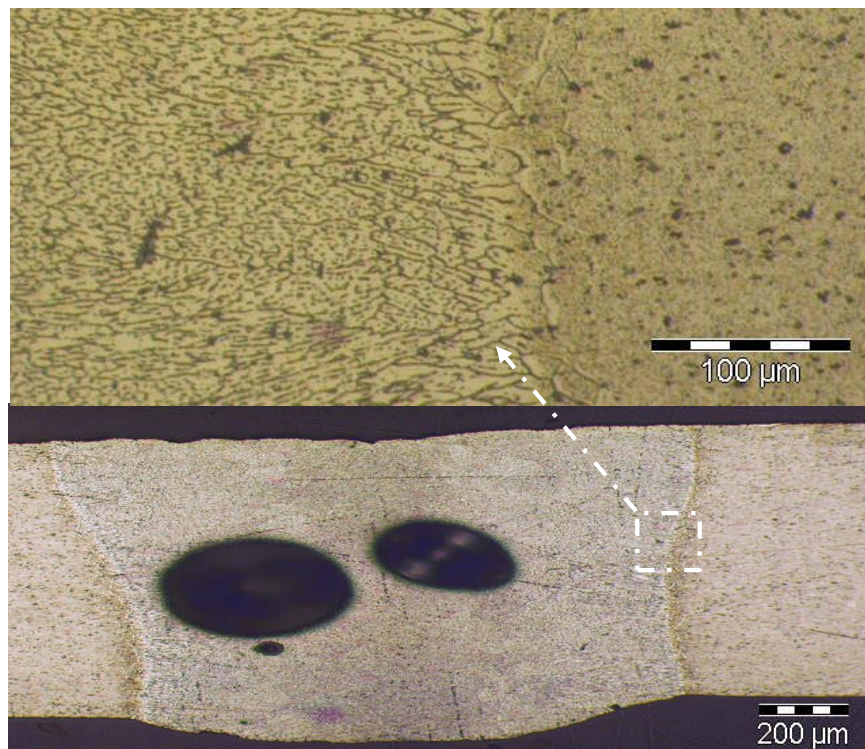


Figura 52- Secção transversal do material Al6082 T6 na espessura de 0,8mm.

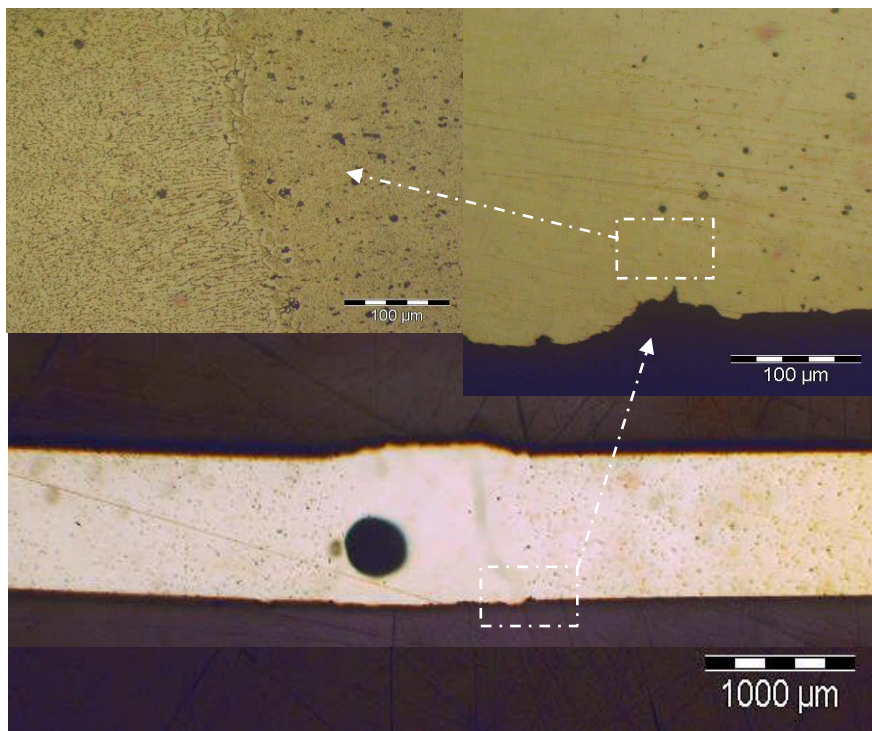


Figura 54- Secção transversal do material Al6082 T6 na espessura de 0,8mm

#### 4.5 Microdurezas

As medidas de microdureza foram realizadas conforme o procedimento apresentado anteriormente, ao longo de uma linha a partir do centro do cordão de soldadura até ao material base. Para medir a dureza do material base foram realizadas medidas nas extremidades das amostras o mais afastado possível do cordão de soldadura.

Sendo assim as durezas dos materiais base são as seguintes:

Tabela 15 - Dureza do material de base.

Material	Espessura (mm)	Dureza (HV)
Al 5083 H111	0,8	88.6
	1	84.3
Al 6082 T6	0.8	118
	1	112

O valor “0” corresponde ao centro do cordão de soldadura. Os valores negativos correspondem ao material à esquerda do centro do cordão e os positivos à direita do cordão.

Os gráficos a seguir apresentam os perfis de microdureza (HV) das soldas. Sendo que em cada gráfico estarão presentes os ensaios realizados às duas espessuras e também estão identificadas os valores das durezas na ZAC.

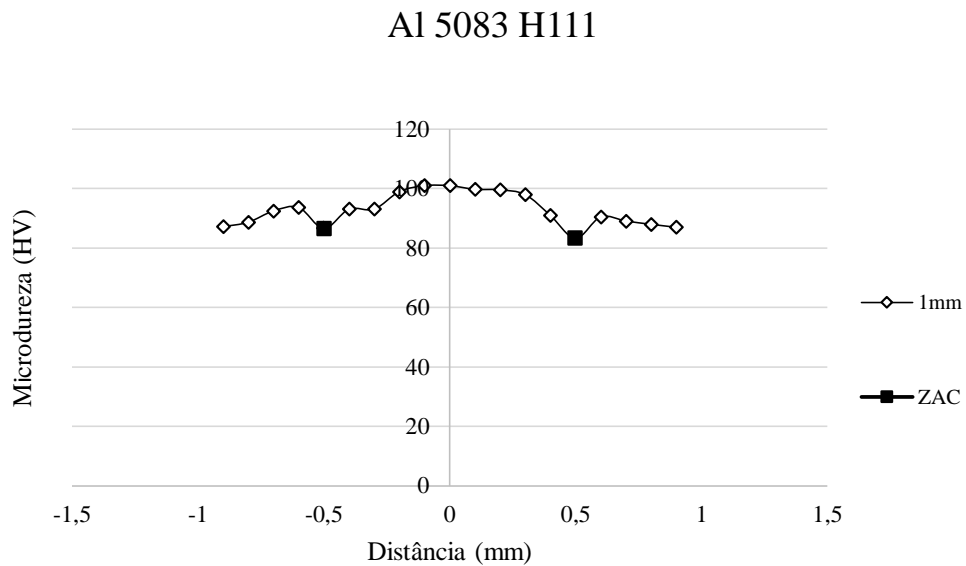


Figura 55- Perfil de dureza para o Al5083 H111 espessura 1mm.

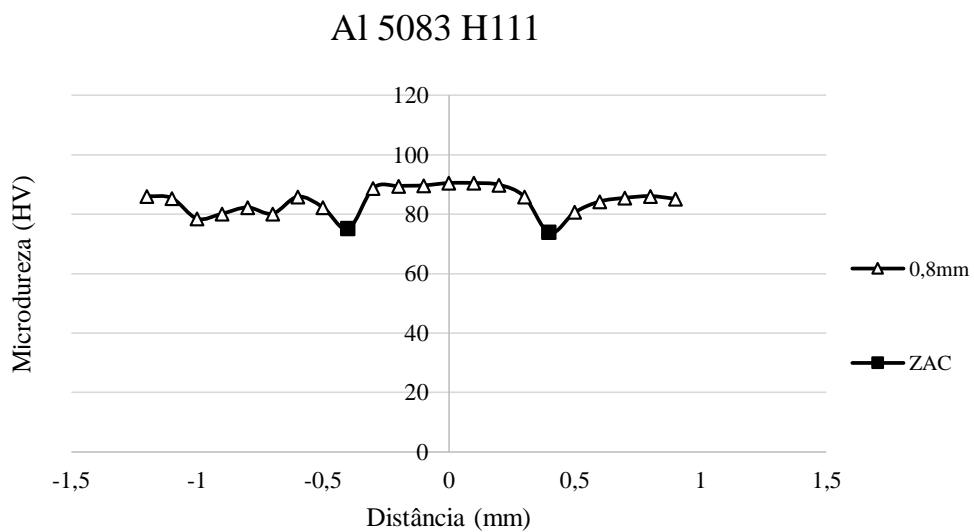


Figura 56- Perfil de dureza para o Al5083 H111 espessura 0,8mm.



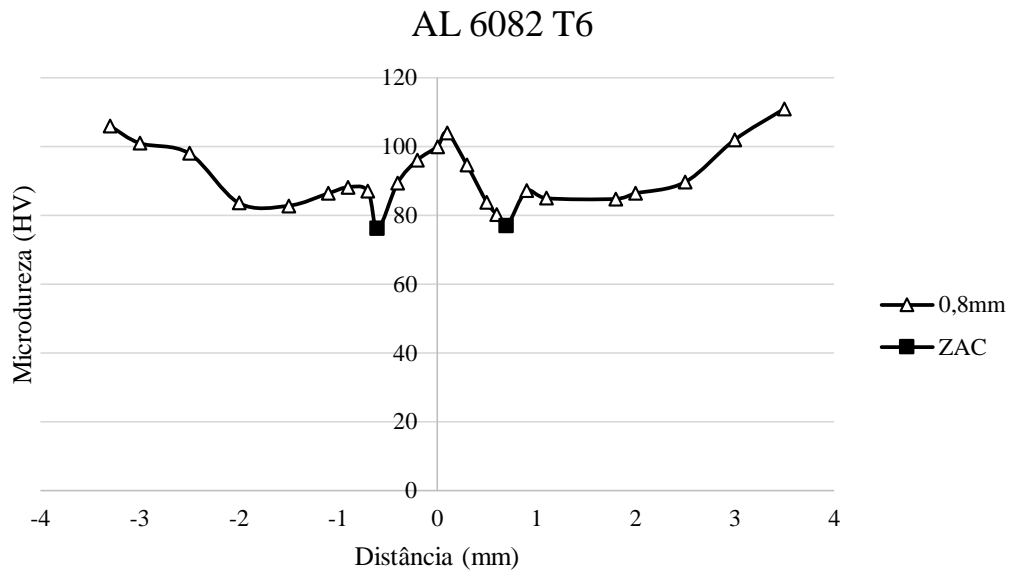


Figura 58 - Perfil de dureza para o Al6082T6 espessura 1mm

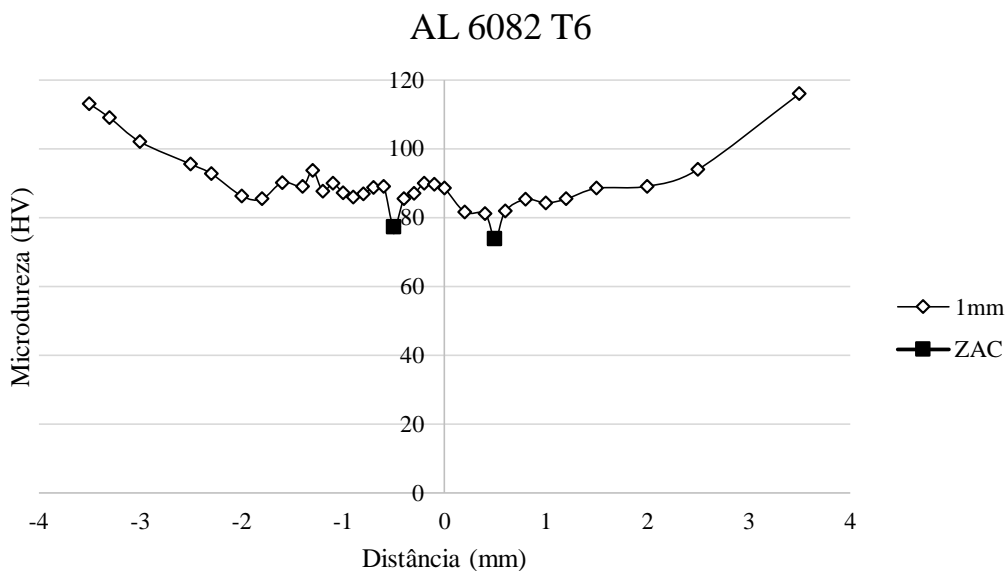


Figura 57- Perfil de dureza para o Al6082T6 espessura 1mm.

É possível de detetar nos dois materiais uma diminuição espontânea da dureza num determinado ponto voltando logo no ponto a seguir a aumentar a dureza, essa redução drástica da dureza significa que estamos perante a ZAC que é material que não fundiu mas devido á passagem do laser sofreu alterações com o aquecimento e arrefecimento bastante rápido.

Com a visualização dos perfis de dureza constata-se que quanto menor for a velocidade de soldadura mais distante será o posicionamento da ZAC em relação ao centro “0” e é necessário mais distancia para a estabilização da dureza em relação ao material base.

#### 4.6 Caso prático da aplicação de um componente embutido com TWB.

Para o caso prático da aplicação de TWBs foi utilizada uma peça estrutural de um automóvel que era apenas constituída por uma material.

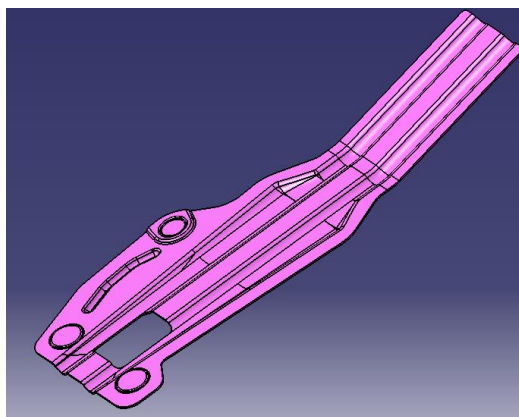


Figura 59- Peça no seu formato original.

Neste caso foi utilizada a material Al5083 H111 com duas espessuras diferentes.

O componente foi dividido em três partes sendo que nas extremidades foram aplicadas a espessuras maiores e no meio ficou a espessura inferior. Foram depois realizados cortes no planificado original para serem estampados.



Figura 60- Planificado  
após soldadura

Com o planificado pronto procedeu-se á estampagem utilizando a mesma ferramenta de modelo original, o qual pode provocar problemas pois a pressão não irá ser aplicada de igual forma em todo o material devido às diferentes espessuras, podendo provocar um degrau ao fluxo de material.

Depois de estampado o planificado e realizado o corte da peça o resultado final é apresentado na figura seguinte.



Figura 61- Componente com a aplicação dos TWBs.

O resultado final do componente vem demonstrar que o cordão de soldadura apenas resistiu as deformações, pois as solicitações de deformação foram aplicadas paralelamente ao cordão.

Também é de igual forma importante lembrar que todas as alterações realizadas na peça foram unicamente feitas de maneira a testar o cordão de soldadura por isso não é garantido que a peça obtida com a aplicação dos TWBs tenha as mesmas características mecânicas da peça inicial.

## 5 Considerações finais

### 5.1 Conclusões

No presente trabalho foi realizada uma investigação para a obtenção de parâmetros de soldadura a laser de fibra em chapas de ligas de alumínio Al 5083 H111 e Al6082 T6 nas espessuras de 1 e 0,8mm. Para testar o comportamento dos materiais após as soldaduras foram realizados ensaios de dobragem, tração e formabilidade. Por outro lado, foram feitos ensaios metalográficos e de microdureza para analisar as características do cordão de soldadura obtido através de determinadas combinações de parâmetros de soldadura.

Após a análise de todos os ensaios conclui-se que todos os provetes apresentavam porosidade em grande quantidade para além de também ser visível o aparecimento de rechupe em todos os cordões, fazendo com que na zona do cordão de soldadura ocorresse uma redução da secção resistente e levando em todos os ensaios à rotura prévia dos provetes na zona do cordão.

Como a velocidade é um parâmetro que está diretamente relacionado com a potência e sabendo que quanto menor a velocidade, maior será a dimensão do cordão, pois maior será a energia depositada, conclui-se que devido á baixa potência do laser fomos obrigados a aplicar baixas velocidades levando ao aumento da área que sofreu uma redução da resistência.

O aparecimento da porosidade está relacionado com o regime de escoamento com que o gás é depositado (laminar ou turbulento). O gás de assistência deve sempre incidir sobre o cordão segundo um estado laminar e para isso deve ser possível ter em atenção um correto funcionamento do bico do bocal de soldadura, assim como uma quantidade aceitável de gás, de forma a garantir o regime de escoamento pretendido. É de concluir também que a porosidade e as mordeduras presentes nos cordões de soldadura são resultado de uma má ou insuficiente proteção dos gases de assistência. ([Vilas 2013](#))

Com a realização dos ensaios de tração e de formabilidade constata-se que a qualidade da soldadura está muito aquém do desejado, pois características como a CLE e a extensão após rotura dos provetes soldados ficam muito distantes dos resultados esperados.

## 5.2 Trabalhos futuros

Seria de todo o interesse a realização dos mesmos ensaios com a utilização de um laser com potência mais elevada, visto que foi uma dos fatores que influenciou o uso de velocidades reduzidas levando ao aparecimento de demasiada porosidade.

Outro ponto que seria interessante realizar, seria a soldadura provetes o posicionamento do cordão paralelo á solicitação imposta para ver qual seria o comportamento, pois em todos os ensaios realizados o cordão de soldadura encontrava-se na perpendicular em relação ao esforço aplicado.

Também era de igual forma importante a realização dos ensaios de Nakazima com provetes homogéneos (sem cordão de soldadura) para ver o comportamento do material base.

Outro ponto interessante seria a adição de material durante o processo de soldadura de forma a melhorar gradualmente os resultados obtidos.

Também era de grande importância a utilização da simulação numérica para a comparação de alguns resultados obtidos tais como os ensaios de formabilidade e de dobragem.

Para terminar e em virtude das chapas a soldar serem de espessuras reduzidas, era interessante o desenvolvimento de um gabari de soldadura ainda mais sofisticado para diminuir o empeno e o desalinhamento do cordão de soldadura.

## 6 Referências e Bibliografia

Steen W. M. – Laser Material Processing – Springer – Verlag, 3ª Ed, London, England , 2003, Cap. 1, 2, 4, 5.

Svelto, O. Principles of Lasers. Ed. Springer. 4ª ed., 604 p., ISBN 0-30645-748-2. 1998

SIEGMAN, A. E. Lasers. Ed. University Science Books. 1ª ed., 1284 p., ISBN 0- 93570-211-5. 1986;

TRUMPF Laser - Manual do utilizador

Ancona, A., T. Sibillano, L. Tricarico, R. Spina, P. M. Lugara, G. Basile e S. Schiavone. 2005. "Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy." *Journal of Materials Processing Technology*.

Adira Laser- Manual de utilizador

Powell, John. 1993. CO2 laser cutting. Vol. 214: Cambridge Univ Press.

Tinoco, João Miguel Araújo. 2010. Desenvolvimento de um sistema de troca automática do nozzle de corte para máquinas de corte por laser. Porto: [s. n.].

Vaz, Tiago João Pintado. 2013. Modelação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Chapas, Caracterização Mecânica e Aplicações a Casos Práticos. Porto

- Malheiro L., 2012. Caracterização Mecânica de Materiais em Chapa Metálica e Problemas de Formabilidade em Componentes para Automóveis. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
- Baptista, Antonio José Caetano. 2006. Modelação Mecânica e Simulação Numerica do Processo de Estampagem Multi-Etapas - Aplicação ao processo de estampagem de chapas soldadas- Coimbra
- Vilas, José Pedro Maia Junqueira. 2013 Otimização de Parâmetros em Soldadura Laser Quantal SA. Porto
- Brust F. W., Paul Scott - “Weld Distortion Control Methods and Applications of Weld Modeling”, Transactions, SMiRT 19, Toronto, August 2007
- DAWES, C. Laser Welding: A Practical Guide. Ed. Abington Publishing. 1ª ed., 272 p., ISBN 1-85573-034-0. 1992;
- Hugo Marques– Modelacao das propriedades mecânicas de juntas soldadas por fricção linear Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009
- Huang DT.D, P.E,P. Keene and L. Kvidahl – “Distortion Mitigation Technique for Lightweight Structure Fabrication”, University of New Orleans (2002)
- Herdawandi Halim , David S. Wilkinson, Marek Niewczas- “The Portevin–Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy” Department of Materials Science and Engineering, McMaster University, 1280 Main Street West, Hamilton, Ontario, Canada L8S 4L7 Received 18 November 2006; received in revised form 25 February 2007; accepted 11 March 2007
- Michaleris, P. and DeBiccari, A., 1997, “Prediction of Welding Distortion” Welding Journal, Welding Research Supplement, 76 (4), p 172s-181s
- Brad Kinsey, Vikram Viswanathan, and Jian Cao. 2001 “Forming of Aluminum Tailor Welded Blanks” Northwestern University, Journal of Materials & Manufacturing, Vol. 110, Section 5, pp. 673-679 SAE: 01M-38

- Pastor, M, H Zhao, RP Martukanitz e T DebRoy. 1999. "Porosity, Underfill and Magnesium Lose during Continuous Wave Nd: YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754." WELDING JOURNAL-NEW YORK- no. 8:207-s.
- Caiazzo, Fabrizia, Vittorio Alfieri, Francesco Cardaropoli e Vincenzo Sergi. 2012. "Butt autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy thin sheets with a Yb:YAG disk laser."1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4637-7>. doi: 10.1007/s00170-012-4637-7.
- DAVIS, J.R. Aluminum and Aluminum alloys, ASM International. 1993, pp18-46
- ANJOS, M. A. ARAUJO, C.S., MARRA,K.M., “A utilização de lasers para a produção de Tailored blanks na indústria automobilística” Seminário Ibero-americano sobre Processamento de Materiais por Laser – Buenos Aires- Abril (1999), 30-34
- G. Totten, D. MacKenzie, Physical Metallurgy and processes, in Handbook of aluminum, vol1, Marcel Dekker, USA, pg 1-7 (2003)
- Aluminum 2014 - <http://www.aluminum.org/>
- M.M.M.Martins, Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro (2008)
- FRAGA, F. E. N. Proposta de Modelo para Caracterizar Susceptibilidade a Distorção Devido à Soldagem em Chapas de Alumínio. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Unicamp. Campinas, SP. 2009.
- BRAY, J. W. Aluminum Mill and Engineered Wrought Products. In: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v. 2, ASM Handbook, ASM International, 1992. p. 118-222.
- ANDERSON, T. Aluminium Weld HAZ Fundamentals. Welding Journal, v. 84, nº 7, 2005.
- Petitjean P.-D., Lescart J.-C., Sener J.-Y. e Delfanne S., Patchworks: de la conception à l’industrialisation, La Revue de Métallurgie-CIT, Octobre (2001) 911-926.
- Trogolo J. M. e Dieffenbach J.R., Evaluation of Tailor Welded Blanks Through Technical Cost Modeling, Society of Automotive Engineers, 980446 (1998).



- [Ullrich e Groche 2002] Ullrich J. e Groche P., Object-oriented modeling of deep drawn tailored blanks, *Design and Manufacture for Sustainable Development* (2002).
- [Belforte 2002] Belforte D.A., Tailor blank welding in Europe, *Industrial Laser Solutions*, Março (2002).
- Eurico Assunção, Soldadura Tailor blanks – TWB, Instituto Superior Tecnico, 2008
- [Rooks 2001] Rooks B., Tailor-welded blanks bring multiple benefits to car design, *Assembly Automation*, Vol. 21, Nº. 4 (2001) 323-328.
- Mesquita R., Baptista R. e Mártires R., Tecnologia de "Tailored Blanks" – A tecnologia e a caracterização das aplicações no mercado internacional, *PROTAP – Projecto para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Componentes Automóvel* (1999).
- The Engineer 2004 A crashworthy diet, *The Engineer*, February (2004).  
(<http://www.theengineer.co.uk>)
- R. Safdarian, Abel D. Santos, R.M. Natal Jorge, Altino Loureiro, Pedro Vilaca, Marco Parente 2014. Experimental study on the effect of the weld line orientation in the FLD of aluminum tailor welded blanks Artigo submetido a “*International Journal of Material Forming*”. Porto